

日本国特許  
JAPAN PATENT OFFICE

PCT/JP03/09122

17.07.03

REC'D 08 AUG 2003  
WIPO

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日

Date of Application:

2002年 7月19日

REC'D 08 AUG 2003

出願番号

Application Number:

特願2002-210778

[ST.10/C]:

[JP2002-210778]

WIPO

PCT

出願人

Applicant(s):

株式会社島津製作所

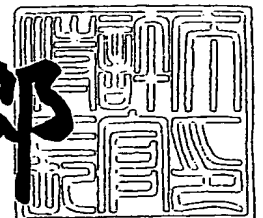
PRIORITY  
DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2002年11月 5日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

太田信一郎



出証番号 出証特2002-3086898

【書類名】 特許願

【整理番号】 K1020265

【提出日】 平成14年 7月19日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 A61B 6/00

【発明者】

【住所又は居所】 京都市中京区西ノ京桑原町1番地 株式会社島津製作所  
内

【氏名】 浮田 昌昭

【特許出願人】

【識別番号】 000001993

【氏名又は名称】 株式会社島津製作所

【代理人】

【識別番号】 100093056

【弁理士】

【氏名又は名称】 杉谷 勉

【電話番号】 06-6363-3573

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 045768

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 X線発生装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ターゲットに対して微小径の電子ビームを照射してX線を発生させるX線発生装置において、前記ターゲットの面方向に前記ターゲットを振動させる振動付与手段を備えていることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 2】 請求項 1 に記載のX線発生装置において、前記振動付与手段は、ターゲットへの電子ビームの衝突点における軌道が直線状または円弧状、さらにジグザグ状や正方形状などの二次元形状となるように振動させることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 3】 請求項 1 または 2 に記載のX線発生装置において、管電圧、管電流、電子ビーム径、電子衝突部付近の測定温度のいずれかに応じて前記振動付与手段を制御する振動制御手段を備えていることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 4】 請求項 3 に記載のX線発生装置において、前記振動制御手段は、電子ビーム径以上の振幅で振動を制御し、かつその振幅を可変とすることができることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 5】 請求項 3 または 4 に記載のX線発生装置において、前記振動制御手段は、振動の周波数を可変とすることができることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 6】 請求項 1 から 5 のいずれかに記載のX線発生装置において、前記振動付与手段は、圧電素子を備えていることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 7】 請求項 6 に記載のX線発生装置において、前記圧電素子とターゲットを被着した保持体とを一体的に構成して閉塞空間を形成することを特徴とするX線発生装置。

【請求項 8】 請求項 1 から 7 のいずれかに記載のX線発生装置において、前記保持体を当接支持するイタバネを備えることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 9】 請求項 8 に記載のX線発生装置において、前記イタバネは放電加工によって作成されていることを特徴とするX線発生装置。

【請求項 1 0】 請求項 1 から 9 のいずれかに記載のX線発生装置において

、前記ターゲットを真空封止するためにゴムまたはイタバネを備えていることを特徴とするX線発生装置。

【請求項11】 請求項1から10のいずれかに記載のX線発生装置において、前記ターゲットの厚さは、管電圧により計算される電子のターゲットに対する進入距離の2倍以下であることを特徴とするX線発生装置。

【請求項12】 請求項1から11のいずれかに記載のX線発生装置において、前記振動制御手段は、ターゲットを変位させることを特徴とするX線発生装置。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

#### 【発明の属する技術分野】

本発明は、X線非破壊検査装置やX線分析装置のX線発生装置に係り、特に微小な対象物のX線透視像を得るために微小径の電子ビームを照射してミクロンサイズのX線源を有する装置に関する。

##### 【0002】

#### 【従来の技術】

従来、この種のX線発生装置としては、例えば、特開2002-25484号公報、特開2001-273860号公報、特開2000-306533号公報に開示されているものが挙げられる。

##### 【0003】

これらの装置は、真空中で負の高電位（ $-S_v$  [V]）に保たれた電子源から発生する電子（ $S_a$  [A]）を、接地電位0Vとの電位差によって加速し、電子レンズで直径20～0.1  $\mu\text{m}$ 程度に収束させている。このようにして収束された電子ビームを、金属などの固体からなるターゲット（例えば、タングステン（W）、モリブデン（Mo）、銅（Cu））に衝突させることでミクロンサイズのX線源を実現している。このときに発生するX線の最大エネルギーは、 $S_v$  [keV]となる。これらの装置のうち特に高分解能なのは、透過型マイクロフォーカスX線発生装置と呼ばれており、たとえば膜厚5  $\mu\text{m}$ 程度のターゲットを、X線透過性のあるアルミニウム（Al）の保持体（例えば、膜厚0.5 mm）などの

薄板上に成膜して、ターゲットで発生したX線が、電子ビームの入射方向に窓を透過して大気中で利用できるようにしたものである。このような保持体は、ターゲットが薄膜では強度的に大気圧に対して耐えられないために用いられ、真空窓と呼ばれる。真空窓はOリングなどを介して真空容器に締め付けて固定されている。この固定する部分は、電子レンズの先端中央部となっており、電子ビームが収束されて通過する直径10mm程度の真空経路が形成されている。

## 【0004】

このような透過型マイクロフォーカスX線発生装置では、ターゲットを電子レンズに密着して近づけられ、電子レンズの収差の影響を小さくできるので、電子収束径を最小にできる。したがって、最小のX線焦点を得る事ができ、高分解能なX線透視画像が得られる。また、被写体とX線焦点を近づけられるので、高倍率の撮影が可能である。このようなX線管は、被検体の内部の微小な欠陥などを探す検査装置に用いられており、長い時は1被検体あたり数時間にも及ぶ検査作業が行われる。

## 【0005】

## 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、このような構成を有する従来例の場合には、次のような問題がある。

すなわち、加速された電子（電力 $S_a \cdot S_v$  [W]）をターゲットに衝突させてX線を発生させる場合、その電力の大部分は熱となり、X線の発生効率も1%以下である。衝突により発生する熱は、ターゲットの電子衝突部分の温度を上昇させるので、ターゲット材料の蒸発が起こり、さまざまな問題を引き起こす。

## 【0006】

そこで、従来の透過型マイクロフォーカスX線発生装置では、ターゲットの寿命が近づくと装置を停止させ、真空容器に締め付けられている真空窓を緩め、真空窓を回転させたり交換したりして、電子衝突部を新しいターゲット面に換えてえて運転を再開するようにしている。そのため、長期間にわたって連続してX線を発生させることができなかったり、X線発生装置の稼働率を低下させたりするという問題の原因となっている。特に、大きな被検体では、X線強度を大きくす

るために、負荷電力を大きくして動作させる。このような場合にはターゲットの寿命が短く、頻繁にX線発生装置を停止させなければならないという問題がある。さらに、出力できるX線強度には限界があり、マイクロフォーカスX線管は暗いため作業効率を上げられないという問題もある。

【0007】

ここで、電子ビーム電力とビーム径からターゲット寿命の試算方法について説明する。

【0008】

半無限の大きさを持ち熱伝導度  $K$  [ $W/cm^{\circ}C$ ] の固体表面上にある直径  $s$  [ $\mu m$ ] の円内に、電子ビーム電力 ( $S_v \cdot S_a$  [ $W$ ]) の全てが衝突するときの定常温度上昇  $\Delta T$  [ $^{\circ}C$ ] は、以下のように表される (参考: 石川順三 荷電粒子ビーム工学、コロナ社、2001年5月18日初版、p145)。

【0009】

$$\Delta T [^{\circ}C] = 2 \times 10^4 \cdot (S_v \cdot S_a) / (\pi K s) \quad \dots\dots (1)$$

【0010】

この式 (1) より、温度上昇は、電力に比例し、衝突径  $s$  に反比例する。また、同じ温度上昇にするためには、衝突径  $s$  あたりの電力を一定にすればよいことを示している。また、衝突径  $s$  の時の衝突面積  $S = \pi (s/2)^2$  であるので、温度上昇  $\Delta T$  は面積  $S$  のルートに反比例するともいえる。例えば、同じ電力なら面積を4倍にすれば温度上昇は  $1/2$  になる。

【0011】

ターゲットがタングステン (W) である場合、定常温度上昇  $\Delta T$  は、タングステンの融点 ( $3410^{\circ}C$ ) のときの熱伝導度  $K = 0.9$  [ $W/cm^{\circ}C$ ] を用いて試算できる。よって、室温とおなじ  $27^{\circ}C$  のターゲットに、電子ビームを照射した時の電子衝突面の定常温度  $T = 300 + \Delta T$  [ $K$ ] と試算できる。

【0012】

次に、温度  $T$  [ $K$ ] の固体の蒸散量  $d$  [ $kg/m^2 sec$ ] は、以下の Langmuir の式 (2) によって試算される。

【0013】

$$d = 4.37 \times 10^{-3} \cdot P \sqrt{M/T} \quad \dots\dots (2)$$

【0014】

この式で、Mは固体材料の原子量で、タングステンの場合M=183.8である。また、温度T [K] の時の固体の蒸気圧をP [Pa] としている。このP [Pa] は、定数A=44000、B=8.76、C=5、D=0として次の(3)式から試算される。

【0015】

$$\log P = -A/T + B + C \log T - DT + 2.125 \quad \dots\dots (3)$$

【0016】

上記の蒸発量dの単位を変換し、タングステン(W)の密度=19.3 [g/cm<sup>2</sup>] で割ると、単位時間あたりの蒸発量(厚み) [μm/時間] を試算することができる。

【0017】

以下に、タングステン(W)製ターゲットの寿命について各種電子ビーム負荷条件のもとに試算した結果(表1)と問題点を例示していく。表1中のターゲットの寿命は、微小なX線焦点を考慮し、ターゲットが衝突径sと同じ厚さ分蒸発するまでの時間としている。

【0018】

【表 1】

負荷 条件	電子ビーム		従来の 固定式ターゲット			本発明の 振動ターゲット (5 $\mu\text{m}$ 振動)		
	衝突 径	電力	衝突 面積	温度	寿命	衝突 面積	温度	寿命
No.	s [ $\mu\text{m}$ ]	[W]	S [ $\mu\text{m}^2$ ]	T [K]	[時間]	S [ $\mu\text{m}^2$ ]	T [K]	[時間]
①	1	0.32W	0.79	2,576	142	5.79	1,140	4.7E+27
②	1	0.35W	0.79	2,790	7	5.79	1,219	1.5E+21
③	1	0.86W	0.79	6,417	(蒸発)	5.79	2,557	189
④	1	1.0W	0.79	7,413	(蒸発)	5.79	2,925	1.3
						(10.79)	(2,217)	(82,381)
⑤	0.1	0.24W	0.0079	17,371	(蒸発)	0.08	2,423	169
		(0.32W)				(1.01)	(2,309)	(1,341)

【0019】

## ■問題点1

『ターゲット寿命により稼働時間ロスが発生する』

【0020】

負荷条件①は、マイクロフォーカスX線管の通常の使用負荷の例である。X線焦点サイズが1  $\mu\text{m}$ 程度となるように、ターゲット上の衝突径  $s = 1 \mu\text{m}$  に電力0.32Wの電子ビームを衝突させた場合、衝突部の温度は2576Kとなり、寿命は142時間と試算できる。この場合、142時間ごとに装置を停止し、ターゲットを緩めて回転させたりして新しいターゲット面に電子ビームを照射するようにしてから運転を再開することになる。ターゲットを緩めるので真空が破れ、再度真空引きを行う必要があるため、2時間ほどはX線を発生できないために稼働率を低下させる問題がある。この場合の稼働率は、連続稼働を想定して  $142 / (142 + 2) = 99\%$  で、週に1度2時間の保守作業をする手間がかかる。負荷電力を下げれば寿命が延びるが、X線強度が弱くなり透視撮影に時間がかかるので作業効率が低下する。

【0021】

## ■問題点2



『X線強度の上限があり、作業効率が上がらない』

【0022】

負荷条件②は①より少し高強度にした例で、電力を0.32Wから0.35Wに9%増加させた場合の試算である。同じ加速電圧で電流を9%増加させた例としており、X線強度が9%増加し作業効率が9%増加する。しかし、衝突部の温度は2790Kとなり、寿命は7時間と試算できる。したがって、わずか9%X線強度を向上させたために、7時間ごとに新しいターゲット面に交換する作業が必要となり、稼働率は $7/(7+2)=78\%$ で、①にくらべ極端に低くなる。

【0023】

負荷条件③と④は、①にくらべ3倍ほど高強度にした場合の例である。試算では衝突部の温度が、タングステンの融点(約3680K)、沸点(約6200K)を超えており、急速に蒸発するため寿命はない。仮にX線強度が3倍に上がれば、同じ結果を得るために必要な作業時間は、 $1/3$ ですむので、作業効率は3倍にできる。しかし、③④の試算のとおり、負荷電力には限界がありX線強度にも上限があるので、作業効率を上げることはできないという問題がある。

【0024】

■問題点3

『微小焦点化で暗くなる』

【0025】

温度上昇 $\Delta T$ は(1)式のように、単位直径あたりの電子ビーム電力で決まる。したがって、電子ビームを絞って衝突径を小さくする場合には、電子ビームの電力も下げなければならない。例えば、より高分解能化した微小X線焦点となるように、衝突径 $s=0.1\mu m$ にする場合で考える。①と同じような蒸発レートであるためには、電力を $1/10$ にしなければいけないので、作業効率が $1/10$ になる。その上、寿命は「微小なX線焦点を考慮して、ターゲットが衝突径 $s$ と同じ厚さ分蒸発するまでの時間」としているのので、寿命までの蒸発厚さは $1/10$ になり、寿命が $1/10$ になってしまう。この場合の稼働率も、 $14.2/(14.2+2)=88\%$ に低下する。したがって、①と比べた稼働率は大幅に低下する。

## 【0026】

因みに、この程度の微小焦点化は、近年の半導体分野における集積回路の微細化に追随するために必要とされているだけに問題である。参考までに、衝突径  $s = 0.1 \mu\text{m}$  で負荷を大きくした場合の試算結果を表1⑤に示す。電力は①の75%となる電力0.24Wとした。衝突部の温度は17371Kとなり、蒸発のため寿命はない。

## 【0027】

## ■問題点4

『焦点形状の変化があるので、使用に注意が必要』

## 【0028】

表1①のような条件で142時間連続してX線照射を行うと、ターゲットが1 $\mu\text{m}$ 蒸発して薄くなる。その間、電子ビームの衝突する面の形状が変化しており、X線発生領域の形状も変化している。結果としてX線焦点の形状と位置が微妙に変化してゆく。そのため、高空間分解能を求められるマイクロフォーカスX線管では、寿命に関わらず、電子ビーム焦点位置を微妙に調整しながらでないと一定の性能を得られないことがあり、稼働率を下げる問題がある。

## 【0029】

## ■問題点5

『ターゲットは厚めで、ターゲットによるX線の不要な吸収がある』

## 【0030】

寿命の間に同じようなX線焦点であるためには、ターゲットの厚さは電子の最大進入深さとターゲット寿命相当厚さの和以上にしておく必要がある。また、電圧変動による電力上昇などに耐えるためにも、ターゲット厚は厚めに成膜されているのが普通である。

## 【0031】

例えば、管電圧40kVのとき加速された40keVのエネルギーをもった電子はタングステンターゲットに衝突し、制動放射などによりブロードなX線を生じさせながら最大で2.6 $\mu\text{m}$ 進入する。したがって、管電圧40kVで衝突直径=1 $\mu\text{m}$ ならターゲット厚さは3.6 $\mu\text{m}$ 以上必要となり、余裕をみて5 $\mu\text{m}$

程度に設定される。

【0032】

ところが、X線発生領域の最大深さは2.6  $\mu\text{m}$ であるから、ターゲット厚さ5  $\mu\text{m}$ のうちの残り2.4  $\mu\text{m}$ で吸収されなかったものだけが透過X線として利用可能で、発生したX線の利用率が低下する。例えば、20 KeVのX線がタンゲステン2.4  $\mu\text{m}$ を通過する場合80%しか透過しなので、X線強度が低下して作業効率80%に低下するので問題である。

【0033】

■問題点6

『回転陽極式のX線管では、装置を高分解能にできない』

【0034】

ターゲットの熱による問題を解決するために、医療用のmmサイズ焦点のX線発生装置においては、ターゲットを回転させる回転陽極式というものが採用されている。マイクロフォーカスX線発生装置においても、ターゲットを回転させることが考えられる。しかし、回転のために使用するベアリング（玉軸受）では回転精度が不足しているので、ターゲットを精度良く回転させることができない。したがって、X線焦点の変動が生じるため、このような医療用の方式を採用することはできない。特に、X線焦点サイズがミクロンオーダーであるマイクロフォーカスX線発生装置への応用は困難である。

【0035】

前記について具体的に説明を行っておく。

医療用の回転陽極式X線管は、X線焦点サイズが0.2～1 mm程度である。また、真空容器・電子源・陽極円板・回転軸受・モータが一体構成されている。モータは電磁力を利用するので電子ビームに影響を与えるから、離さなければならず、回転陽極式X線管は大型化する。回転軸受としては内径6～10 mmの玉軸受が採用され、外径10～30 mm以上で厚さも2.5～10 mm以上ある。この範囲の玉軸受の最高精度等級はJIS2級で規定されており、内輪のアキシャル振れ精度・ラジアル振れ精度は最大1.5  $\mu\text{m}$ もある。そして、高真空・高温・高速という厳しい条件で使用されるため、特殊な潤滑方式が使われる。例えば、X

線管内部の真空度は $0.13\text{ mPa}$  ( $10^{-6}\text{ Torr}$ ) 以下が必要であるし、陽極の発熱により $200\sim500^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で使用可能でなければならないし、回転速度 $3000\sim10000\text{ rpm}$  ( $50\sim167\text{ cyc/sec}$ ) 程度の高速回転も要求される。以上の厳しい条件を満足するために、軟質金属の薄い皮膜などを固体潤滑剤として用いるという、非常に特殊な潤滑方式となる。その固体潤滑剤の寿命は短いため、X線管の寿命も数百時間と短い問題もある。

## 【0036】

マイクロフォーカスX線管は医療用ほどの負荷電力ではないので、管球がそれほど高温になる事はない。しかし、軸受鋼の線熱膨張係数は $12.5\times10^{-6}$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ ) 程度あり、たった $20^{\circ}\text{C}$ 温度が上昇するだけで $1.5\sim2.5\mu\text{m}$ 内径が膨れて回転精度を悪くする。 $20^{\circ}\text{C}$ の程度の温度上昇は、室温変化や回転による摩擦で生じる熱などにより簡単に起こる。JIS2級で規定されている回転精度とあわせると、 $3\mu\text{m}$ 以下の回転精度は保証外であり、実現不可能である。さらに、回転陽極円板は最低でもベアリング外径より大きくなければならず、直径 $10\text{ mm}$ 以上必要であるため、面の精度である「うねり」をミクロンオーダーにすることは難しい。そのため、X線焦点が $10\mu\text{m}$ 程度変動することになる。X線焦点サイズが $0.2\sim1\text{ mm}$ 程度である医療用の回転陽極式X線管ではこの程度の精度が問題になることはない。しかし、X線焦点サイズがミクロンオーダーであるマイクロフォーカスX線管では、焦点サイズが変化したり、焦点位置が電子ビーム方向にずれたりするので回転陽極式の応用は難しい。

## 【0037】

また、玉軸受は透過型X線の真空窓の厚さ $0.5\text{ mm}$ 程度にくらべ、5倍以上大きく、回転陽極式は大型化する。小さく作りこむことができないので、回転陽極と被検体を近づけられず、幾何学的な拡大倍率を大きくすることが難しい。また、回転陽極にすれば、X線を取り出すための真空窓を別途設ける必要も生じるので、ますます幾何学的な拡大倍率を大きくすることが難しくなる。たとえ高精度な玉軸受が開発されたとしても、高分解能なX線透視画像を得ることは難しい。

## 【0038】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたもので、ターゲットを振動させて

、実効的な電子衝突面積を大きくすることにより、ターゲットの長寿命化を図り、装置の稼働率を高めたり、X線の連続発生時間を長くしたり、X線強度を向上させたりできる高分解能でコンパクトなX線発生装置を提供することを目的とする。

## 【 0 0 3 9 】

## 【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するために発明者が鋭意研究をした結果、本発明は次のような構成をとる。

すなわち、請求項1に記載の発明は、ターゲットに対して微小径の電子ビームを照射してX線を発生させるX線発生装置において、前記ターゲットの面方向に前記ターゲットを振動させる振動付与手段を備えていることを特徴とするものである。

## 【 0 0 4 0 】

(作用・効果) 振動付与手段によってターゲットをターゲットの面方向に振動させる。これにより透過型・反射型を問わずX線焦点位置を変動させることなく、電子ビーム上のX線焦点位置を同じ位置に保ちつつ、電子ビームの衝突点をターゲット上で移動させることができ、ターゲットにおける実効的な電子衝突面積を大きくすることができるので、発生する熱を分散させて電子衝突による集中的なターゲットの温度上昇を抑制することができる。したがって、ターゲットの蒸散を減少させることができる。その結果、ターゲットの長寿命化を図ることができ、ターゲットの交換・調整に起因する装置の稼働率を高めることができ、X線発生時間を長くすることができる。

## 【 0 0 4 1 】

なお、振動とは、ほぼ一定の周期をもって揺れ動くことをいい、ターゲットを単に回転駆動するだけでは得られない作用・効果を奏する。

## 【 0 0 4 2 】

すなわち、回転によるとターゲット上で同一軌道上を電子ビームが繰り返し移動することになる。一方、振動によると、同一軌道上だけでなく、例えば、ターゲット上の第1の領域内を電子ビームが同一軌道を描いて振動した所定時間後、

第 2 の領域内に電子ビームが移動し、そこで同一軌道を描いて振動するようにできる。このような振動によると、電子ビームのターゲット上における軌道を異ならせることができ、より実効的な電子衝突面積を増大させることができる。したがって、一定軌道を描くことからターゲットの一部だけしか利用しない回転型に対して、振動によると、電子ビームの軌道をターゲット面において相違する種々のものに設定することにより、ターゲットの全面にわたって有効に利用することが可能である。

## 【 0 0 4 3 】

逆にいえば、ターゲットの面積を小さくできるので、小形軽量のターゲットとなり、振動付与手段も小形化できる。したがって、X線焦点と被検体を近づけて、幾何学的な拡大倍率を大きくとった高分解能なX線透視撮影を行うことが可能である。

## 【 0 0 4 4 】

ここにいう振動は、その周期が数ヶ月、数週間、数日、数時間、数十H z、数千H z、数MH z等の種々のものを含んでいる。

## 【 0 0 4 5 】

また、振動付与手段は、ターゲットへの電子ビームの衝突点における軌道が直線状または円弧状、さらにジグザグ状や正方形などの二次元形状となるように振動させることが好ましい（請求項 2）。

## 【 0 0 4 6 】

（作用・効果）ターゲット上における電子ビームの軌道は、円弧を描く円形状や、漢字の一の字形状を描いたり（一次元）、ジグザグ・矩形・四角形状を描いたり（二次元）するように振動させることにより、実効的な電子衝突面積を増大させつつも振動の制御を比較的容易に行うことができる。特に二次元的な軌道では、ターゲットを特に小さくできて振動付与手段も小形化できる。

## 【 0 0 4 7 】

また、管電圧、管電流、電子ビーム径のいずれかに応じて振動付与手段を制御する振動制御手段を備えていることが好ましい（請求項 3）。

## 【 0 0 4 8 】

(作用・効果) ターゲットの温度上昇は、管電圧及び管電流に比例し、電子ビーム衝突径に反比例するので、これらに応じてターゲットの保持体の振動を制御することによって好適な振動付与が可能となる。

## 【0049】

また、振動制御手段は、電子ビーム径と同程度以上の振幅で振動を制御し、かつその振幅を可変することができるのが好ましい(請求項4)。

## 【0050】

(作用・効果) 電子ビーム径以上の振幅で制御すれば、温度上昇を抑制することができる。より好ましくは、電子ビーム径の少なくとも2倍の振幅で制御することであり、この場合には振動時における電子ビームの重複がなくなって温度上昇を同程度に抑制することができる。

## 【0051】

また、振動制御手段は、振動の周波数を可変することができるのが好ましい(請求項5)。

## 【0052】

(作用・効果) 電子ビームの出力が高いほど、また電子ビームの焦点径が小さいほど振動の周波数を高くすることにより、電子ビームの全衝突面にわたって均一な温度分布とすることができ、ターゲットの局所的な温度上昇を抑制することができる。

## 【0053】

また、振動付与手段は、圧電素子を備えていることが好ましい(請求項6)。

## 【0054】

(作用・効果) 圧電素子は、磁界を生じないので電子ビームに悪影響を与えることがない。また、高速動作が可能であってミクロンオーダの微小変位動作が可能であるので、振動付与手段に好適である。

## 【0055】

また、圧電素子とターゲットを被着した保持体とを一体的に構成して閉塞空間を形成することが好ましい(請求項7)。

## 【0056】

(作用・効果) ターゲットの真空保持のために真空窓が不要となるので、構成が簡易化できる。さらに、真空窓が不要であるので、X線焦点と被写体との距離を最小にすることができ、幾何学的な拡大倍率を高くすることができる。

## 【 0 0 5 7 】

また、保持体を当接支持するイタバネを備えることが好ましい(請求項8)。

## 【 0 0 5 8 】

(作用・効果) ターゲットで発生した熱をイタバネから放熱させることができるので、さらに温度上昇を抑制することができる。さらに、電子ビーム方向へのターゲットの振動を抑制することができるので、X線焦点の移動を高精度に抑制しつつターゲットの面方向へ振動を与えることができる。

## 【 0 0 5 9 】

また、イタバネは放電加工によって作成されていることが好ましい(請求項9)。

## 【 0 0 6 0 】

放電加工は寸法精度が高く、厚い金属板を厚さ方向に貫通加工できるので、アスペクト比の高いイタバネを一体的に作成できる。アスペクト比の高いイタバネは、元の金属板の厚さ方向のブレがなく、元の金属板の厚さ方向に対して高精度である。また、元の金属板の厚さ方向と電子ビーム方向が同じであれば、高精度の振動が可能である。

## 【 0 0 6 1 】

また、ターゲットを真空封止するためにゴムまたは／およびイタバネを備えていることが好ましい(請求項10)。

## 【 0 0 6 2 】

(作用・効果) ターゲットには振動が付与されるので、振動を吸収できるゴムやイタバネを単独で用いたり、それらを組み合わせて用いたりすることにより、ターゲットを真空封止することができる。したがって、真空窓を不要にでき、X線焦点と被写体との距離を最小にすることができ、幾何学的に拡大倍率を高くすることができる。

## 【 0 0 6 3 】



また、ターゲットの厚さは、電子ビームのエネルギーに応じた電子のターゲットに対する進入距離の 2 倍以下であることが好ましい（請求項 1 1）。

## 【 0 0 6 4 】

（作用・効果）ターゲットの長寿命化により厚いターゲットが不要となるので、最低限のターゲット厚さとすることができ、その厚さは、電子のターゲットへの進入深さの 2 倍以下である。このような厚さにすることにより、不要な X 線吸収を最低限にすることができ、効率良く X 線を利用することが可能である。特に、吸収されやすい軟 X 線を利用する場合に好適である。

## 【 0 0 6 5 】

また、電子ビームによるターゲットへの負荷が低い場合には、振動制御手段はターゲットを振動させずに一定の変位を与えるようにしてもよい（請求項 1 2）。

## 【 0 0 6 6 】

（作用・効果）電子ビームによるターゲットへの負荷が低く、振動させなくても数時間～数日以上ターゲット寿命がある場合、振動制御手段はターゲットを電子ビーム衝突径の数倍以上の距離だけ変位（移動）させ静止させるようにする。したがって、変位だけでターゲット上の電子ビーム衝突点を新しくできるので、固定式ターゲットに比べ非常に短時間で異なる位置に移動させることができ、稼働時間ロスがなくなる。その場合、各位置において振動を付与しておいてもよいし付与しなくてもよい。

## 【 0 0 6 7 】

## 【発明の実施の形態】

以下、図面を参照してこの発明の一実施例を説明する。

図 1～図 4 は本発明の一実施例に係り、図 1 は透過型 X 線管の概略構成を示す縦断面図であり、図 2 は X 線発生装置の概略構成を示すブロック図であり、図 3 はターゲット上における電子ビームの振動を示す模式図であり、図 4 は電子ビームの衝突面を拡大した模式図である。

## 【 0 0 6 8 】

透過型 X 線管 1 は真空容器 3 を備えており、電子ビーム B を発生させるための

電子銃 2 を内蔵している。真空容器 3 の電子銃 2 の反対側には X 線を発生する部分があり、その先端部材 5 は電子レンズの先端部材でもある。先端部材 5 はその中央部に直径 1 0 m m 以下の開口 7 を有し、ターゲット 9 が被着された保持体 1 1 が開口 7 内に密着して取り付けられている。ターゲット 9 はタングステンやモリブデンなどの金属で構成されており、電子ビームが照射されると X 線が発生する。保持体 1 1 に近接して、真空窓 1 3 が取り付けられている。この真空窓 1 3 は先端部材 5 にネジ止めされた取り付け部材 1 7 によって押さえ込まれており、開口 7 周辺に埋設された O リング 1 5 とともに真空封止の役割を果たしている。保持体 1 1 と真空窓 1 3 は、アルミ等の X 線を透過する材料で構成されている。真空窓 1 3 は、大気圧に対して真空を保持する強度が必要なため、板厚 0 . 5 m m 以上にしている。

## 【 0 0 6 9 】

透過型 X 線管 1 は、電子銃 2 から放射された電子ビーム B が先端部材 5 の電子レンズ先端部付近で収束されてターゲット 9 に照射される。電子ビームが照射されたターゲット 9 からは X 線が発生し、保持体 1 1 及び真空窓 1 3 を透過して、照射 X 線 2 1 として放射される。電子レンズ光学系を用いるので、電子の収束位置をビーム軸上で変化させてターゲットへの電子衝突径を変化させられる。したがって X 線焦点サイズを変化させることも可能である。ターゲット面上に収束点ができるようにレンズを調整した時に、電子レンズの収差で決まる最小の X 線焦点となる。電子レンズの種類や構成にもよるが、SEM などの電子光学系を使えば電子収束径は n m オーダーも可能である。また、電子銃のみでも 1 0 ~ 1 0 0  $\mu$  m 程度の電子収束径が得られるので、特別な電子レンズのない構成も考えられる。さらに、被写体と使用目的により様々な構成が考えられる。

## 【 0 0 7 0 】

本実施例では、先端部材 5 における開口 7 の内周面に配設された振動付与部 2 3 によって、上記の保持体 1 1 を振動させることでターゲット 9 を振動させられるようになっている。この振動は、電子ビーム照射中であっても電子ビーム B の衝突点にあたる X 線焦点が変動しないように、ターゲット 9 の面方向に振動するようになっている。

## 【0071】

この発明における振動付与手段に相当する振動付与部23は、振動制御手段に相当する図2の振動制御部25により、振動の振幅や周波数等が制御される。電子銃2に与えられる管電圧や管電流等は、高電圧発生器27によって制御される。これらの振動付与部23及び高電圧発生器27は、オペレータにより与えられた指示に基づく動作を行う制御部29によって統括的に制御される。

## 【0072】

振動付与部23は、例えば、図3に示すように、ターゲット9における電子ビームBの衝突点が直線的に往復運動するように振動を付与する。なお、このように直線的な軌道とする場合には、図4に示すように、少なくとも振幅が電子ビーム径 $B_a$ 以上となるようにするのが好ましい。このように制御することにより、電子ビーム衝突面の昇温を抑制できる。より好ましくは、少なくとも振幅が電子ビーム径 $B_a$ の2倍( $2B_a$ )以上となるようにする。この場合には、振動時における電子ビームBの重複がなくなって電子ビーム衝突面の温度上昇を均一に抑制するのに好適である。

## 【0073】

次に、上述した従来例における問題点1～4がこの実施例により解決され改善されることをまず説明しておく。なお、実施例の詳細な振動付与手段のうち、特徴のある複数の具体例は後述する。これは、微小な振動はとても簡単に起こり、千差万別の実施例が考えられるため書ききれないのに、特定の実施例で説明しては、誤解を与えると判断したからである。例えば、ミクロンオーダの振動は自然界に普通に存在し、モータの振動が伝播してたまたまターゲットが振動するといったことも経験したりする。特許でも、防振機構の特許の方が価値を認められる。また、回転機構では玉軸受が使われるというような特定の基本部品が、本発明のような微小な振動では考えられないためである。

## 【0074】

表1の①～④のように電子ビーム衝突径 $s$ が $1\mu\text{m}$ の場合の改善度合いを試算していく。従来型の固定式ターゲットに対して電子ビームBを衝突させている時の衝突面積 $S$ は、 $\pi(0.5)^2=0.79[\mu\text{m}^2]$ である。一方、本発明の

振動の一例として、 $5\text{ }\mu\text{m}$ の振動振幅でターゲット9を振動させた場合、電子ビームの衝突面積 $S$ の合計は、 $(\pi(0.5)^2 + 1 \times 5) = 5.79 [\mu\text{m}^2]$ となる。したがって、衝突面積 $S$ は $5.79 / 0.79 = 7.3$ 倍となり、円形に換算した直径 $s$ は $2.7\text{ }\mu\text{m}$ となる。よって、式(1)により試算される温度上昇 $\Delta T$ は固定式ターゲットの $1 / 2.7$ となり、式(2)(3)により試算されるタングステンの蒸発量が減少し、ターゲットの寿命が延びることが期待できる。寿命の試算結果を表1「振動ターゲット」に示し、改善度合いについて以下に説明していく。

## 【0075】

## ●問題点1の改善『超長寿命により稼働時間ロスがなくなる』

負荷条件①は、マイクロフォーカスX線管の通常の使用負荷の例であった。この①の場合、固定式ターゲットの寿命142時間に比べ、本発明による寿命は $4.7 \times 10^{27}$ 時間に改善され、無限の寿命とみなせる。また、装置の稼働率は100%に改善され、週に2時間の保守作業も不要になる。

## 【0076】

## ●問題点2の改善『X線強度が上がり、作業効率が上がる』

負荷条件②は①より少し高強度にした例で、電力を $0.32\text{ W}$ から $0.35\text{ W}$ に9%増加させた場合の試算である。この②の場合、固定式ターゲットの寿命7時間に比べ、本発明による寿命は $1.5 \times 10^{21}$ 時間に改善され、無限の寿命とみなせる。装置の稼働率は78%から100%に改善され、7時間ごとに2時間の保守作業も不要になる。固定式ターゲットでの①にくらべ、X線強度増加9%による作業効率増加9%をそのまま享受できるので、9%増の検査作業ができるようになる。

## 【0077】

負荷条件③は、①にくらべ2.7倍ほど高強度にした場合の例である。固定式ターゲットでは寿命はなく使用不可であったが、本発明による寿命は189時間に大きく改善されている。固定式ターゲットの①の場合に比べ、寿命が189時間/ $142\text{ 時間} = 1.3$ 倍、X線強度が $0.86\text{ W} / 0.32\text{ W} = 2.7$ 倍に向上しており、作業効率が2.7倍向上する。

## 【0078】

負荷条件④は、①にくらべ3.1倍ほど高強度にした場合の例である。固定式ターゲットでは寿命はなかったが、本発明による寿命は78分もある。固定式ターゲットの①の場合に比べ、作業効率が3.1倍向上する。

## 【0079】

負荷条件①～④の改善説明は、本発明の一例としてターゲットを5 $\mu$ m振動させた場合であった。しかし、③と④の改善では寿命が短いように感じられるかもしれない。そこで、本発明では簡単に振動振幅を変更できることを利用し、10 $\mu$ m振動させた場合の試算結果を表1中に括弧で示し補足する。この場合、負荷条件④であっても、衝突部温度=2217K、寿命=82381時間と試算され、寿命が充分長くできることがわかる。つまり、本発明によれば、3倍以上のX線強度と長寿命は簡単に実現することができ、作業効率も大幅に上げる事が可能になる。

## 【0080】

## ●問題点3の改善『微小焦点化でも暗くならない』

表1⑤は、近年の半導体分野における集積回路の微細化に追随するために必要とされているX線焦点サイズの微小化へ、本発明を応用する場合の改善例である。表1の①～④では、電子衝突径が1 $\mu$ mの場合の改善を説明しが、表1の⑤では電子衝突径を0.1 $\mu$ mとした場合の改善が示されている。固定式ターゲットでは1/10の負荷である0.032Wに下げた低強度X線で検査を行うしかなかった。⑤のように0.24Wと無理に負荷を上げると寿命がなかった。しかし、本発明によれば、寿命は169時間もあり使用可能に改善される。従来固定式ターゲットの①の寿命142時間に比べても20%も長い。X線強度も①の75%もある。

## 【0081】

しかし、⑤の改善では強度が低下するように感じられるかもしれない。そこで、①と同じ強度（電力0.32W）で10 $\mu$ m振動させた場合の試算結果を表1中に括弧で示し補足する。寿命=1341時間と試算され、寿命が充分長くできることがわかる。つまり、本発明によれば、微小焦点化でも暗くならないことが

わかる。したがって、作業効率を低下させずに、より詳細な検査が行えることになり、微細化している半導体検査に充分使えるようにできる。

## 【 0 0 8 2 】

●問題点 4 の改善『焦点形状の変化が極微小なので、使用が楽になる』

従来、高空間分解能を求められるマイクロフォーカス X 線管では、寿命に関わらず電子ビーム焦点位置を微妙に調整しながらでないと一定の性能を得られないことがあり、使用に注意しなければならない問題があった。しかし、問題点 1 の改善でも述べた表 1 ①の寿命を比較すればこの問題が大幅に改善されていることがわかる。固定式ターゲットの寿命 1 4 2 時間に比べ、本発明による寿命は  $4.7 \times 10^{27}$  時間に改善され、無限の寿命とみなせる。つまり、1 0 万時間使用してもターゲットの蒸発厚は  $2 \times 10^{-19} \mu\text{m}$  しかなく衝突径  $1 \mu\text{m}$  に対してまったく問題にならないので、無調整で性能が維持でき、使用が楽になる。

## 【 0 0 8 3 】

以上で述べたように、従来例における問題点 1 ～ 4 が、本発明の請求項 1 により解決され大幅に改善されることを表 1 を中心に説明してきた。試算では、振動による電子衝突面はすべて、図 3 のような直線的な軌道であるとした。それ以外の電子ビーム B の他の軌道としては、図 5 ～ 8 のようなものであってもよい（請求項 2）。

## 【 0 0 8 4 】

図 5 は、側面から見て円形状・円弧状を呈するように振動させる例である。図 6 は、図 5 の構成とは円弧の方向を逆に構成したものであり、側面から見て円形状を呈するように振動させる例である。

## 【 0 0 8 5 】

図 7 は、ターゲット 9 において、円弧軌道を描くように保持体 1 1 を振動させる例である。この場合、例えば、リング状の超音波モータによって保持体 1 1 を回転往復駆動して、二点鎖線矢印で示すように円弧状に振動を付与するように構成してもよい。また、超音波モータに代えて静電モータによって振動を付与するようにしてもよい。

## 【 0 0 8 6 】

図8は二点鎖線矢印で示すように二次元方向に保持体11を振動させ、電子衝突部全体の大きさが $6\mu\text{m}$ の例である。図8中に点線で示すように、それぞれ異なる軌道を描くように、左右方向に振動させ、所定時間後に上下方向に異なる位置で左右振動を付与するようにしている。ここで、この二次元振動の両方向の振幅とも $6\mu\text{m}$ とし、電子ビーム衝突径 $s=1\mu\text{m}$ であるとする、図3などの直線軌道に比した面積は6倍になり、式(1)よりターゲット面の温度上昇は $1/\sqrt{6}$ となり、ますます寿命を延ばすことができ有利である。また、ターゲット面を無駄なく有効に使うことができるようになる。逆にいえば、最小のターゲット面積にできるので保持体11も最小限の重さですむ。そのため、振動させるためのエネルギーが最小にでき、振動付与部を最小化することができる顕著な効果がある。その他、ジグザグに振動させてもよい。

【0087】

次に、上述した振動制御部25における制御例について説明する。

【0088】

請求項3による振動制御部25は、被写体に応じて制御部29によって設定される電子ビームBの衝突径 $s$  [ $\mu\text{m}$ ]、管電圧 $-S_v$  [V]、管電流 $S_a$  [A]に応じて振動振幅 $V_w$  [ $\mu\text{m}$ ]や振動周波数 $V_f$  [Hz]を最適に制御する。または、電子ビーム衝突点付近の温度を測定して、制御してもよい。

【0089】

なお、通常の管電流 $S_a$ としては設定値を用いればよいが、ターゲット9に直接配備した電流測定器(図示省略)からの信号を $S_a$ として制御するようにしてもよい。

【0090】

制御としては、電子ビーム衝突点付近の測定温度が高いほど、衝突径 $s$ が小さいほど、電力が大きいほど振動振幅や周波数を増加させるようにする。

【0091】

請求項4の例として、「振動振幅」だけを制御する場合は以下の(5)式に従うのが好ましい。

【0092】

$$V_w = \alpha \cdot (S_v \cdot S_a) / s \quad \dots\dots (5)$$

【0093】

係数 $\alpha$ は■問題点1～4の改善で効果があった振幅 $5\mu\text{m}$ の場合を例にすれば、係数 $\alpha = 5 \sim 15$ 程度が好ましい。しかし、係数 $\alpha$ はターゲット熱伝導率 $K$ や負荷や寿命などにより適時変更するのが望ましい。

【0094】

しかしながら、例えば、係数 $\alpha = 5$ 、電力 $1\text{W}$ 、衝突径 $s = 5\mu\text{m}$ のときは、振動振幅 $V_w = 1\mu\text{m}$ となってしまう、常に電子ビーム $B$ が衝突している部分ができるしまうことがある。そこで、これを回避するために、(4)式の計算後に、次の条件判定式によって判定するのが好ましい。

【0095】

「条件判定式」

振動振幅 $V_w < \text{衝突径 } s$ のときは、振動振幅 $V_w = \beta \cdot s$ とする。ここで、係数 $\beta > 1$ である。

【0096】

請求項5の例として、「振動周波数」だけを制御する場合は、以下の(6)式に従うのが好ましい。

【0097】

短時間における熱負荷を考慮した場合、移動速度 $\omega [\mu\text{m}/\text{sec}]$ を考慮する必要がある。本発明の場合、振動による移動速度 $\omega = 2 \cdot V_w \cdot V_f [\mu\text{m}/\text{sec}]$ と近似できるので、振動周波数 $V_f$ の制御は以下の式に従うのが好ましい。

【0098】

$$V_f = \omega / (2 \cdot V_w) = \omega \cdot s / (2 \cdot \alpha \cdot S_v \cdot S_a) \quad \dots\dots (6)$$

【0099】

移動速度 $\omega$ としては、例えば、電子衝突部の移動速度が $2\text{m}/\text{sec}$ となるような回転数の場合に温度が $2500^\circ\text{C}$ 以下となり長寿命であるという実験データがある。これを基準にすると、移動速度 $\omega = 2 \times 10^6 \mu\text{m}/\text{sec}$ とすれば十分であるが、ターゲット熱伝導率 $K$ や負荷や寿命などにより適時変更するのが望



ましい。振動波形は、正弦波や三角波などが適用される。

#### 【0100】

ここで、問題点6で述べた回転陽極式との大きな違いを補足しておく。回転陽極式と本発明の振動式の最もおおきな違いは、電子ビームの軌道の長さにある。回転陽極式ではベアリング等を使用するために、ベアリング外形以上の円板ターゲットが必要である。例えば、最小外形10mmをもつベアリングの場合でもターゲット直径は11mmほど必要である。この場合、電子ビーム照射される軌道長さは31.4mm、材料がアルミ（密度＝ $2.7\text{ g/cm}^3$ ）で厚さが0.5mmとした重さは0.47gもある。それに対し、本発明で例示した電子衝突径 $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度の場合、振動振幅は $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度もあれば充分なので、保持板11の大きさも $1\times 1\text{ mm}$ 以下にできる。この大きさでの重さは、たった0.0014gである。従って、小形軽量化でき、駆動力も小さくてすむ。ターゲット材料の無駄が少ない点も資源・環境問題から望ましい。

#### 【0101】

ここからは上記の実施例のうち、振動付与部23の具体例を、図9～17を順次参照しつつ詳細に説明していく。これらの9つの具体例は、本発明の請求項6から10にあるような構成要素部品を含み、本発明においては特有の効果を発揮する例であるが、本発明の請求項1～5はこれら以外の機構によっても簡単に実現することができる。

#### 【0102】

請求項6にあるように、本発明には圧電素子が最適である。

圧電素子とは、圧電材料に電界を加えると材料の分極方向と電界方向に応じて伸縮することをアクチュエータとして利用したものである。圧電素子の材料には、高分子（ポリビニリデンフロライドとトリフルオロエチレンの共重合体など）やセラミック（チタン酸ジルコン酸鉛 $[\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3]$ などが主成分）がある。アクチュエータとしての特徴は、①微小変位の高精度制御性、②発生応力が大きい、③高速応答性良好、④エネルギー変換効率が大きい、⑤電磁干渉なし、などである。アクチュエータの用途が拡大する中で、特に微小変位の精密制御用として、半導体デバイス製造装置やSTMにおける精密位置決め、細胞操作用のマイクロ

マニピュレータ、光学におけるミラーやレンズの位置・角度・焦点距離調節・工作機械の誤差補正などに多用されている。その他にも超音波の送受素子としても利用されている。変位量は数nm～数百 $\mu$ m、応答周波数はDC～数MHzまで各種のものが製作可能である。

#### 【0103】

アクチュエータとしての圧電素子は、面内変位を利用する直線変位型と面外変位を利用する屈曲変位型の二つに分類できる。

#### 【0104】

さらに、直線変位型は単板型と積層型がある。単板型は厚み方向に分極された圧電板で分極Pと平行に電界を印加して横方向に生じる伸縮変位を利用するものが多いが、「縦変形」、「横変形」、「すべり変形」の三種類の圧電変形を起こさせることができる。積層型は圧電板を積み重ねて一体化したもので、隣り合った圧電板の分極Pの方向は互いに180度向きを異にする。各圧電板は電氣的に並列駆動され、積層方向に変位を生じる。

#### 【0105】

また、屈曲変位型はモノモルフ (monomorph)、ユニモルフ (unimorph)、バイモルフ (bimorph)、マルチモルフ (multimorph) が含まれる。このうちのバイモルフは2枚の圧電板をシム (薄い金属板) の両側に貼り合わせたもので、各圧電板には互いに逆符号の歪みが生じるように電界を印加して屈曲変形させる。構造が簡単で、大きな変位がえられるが、発生力は小さめである。

#### 【0106】

これらの圧電素子は電界で変位を生じるので、電磁モータ等とは異なって磁界を生じない。従って、電子ビームに悪影響を与えないようにすることは簡単で、電子ビームに近接した構成が可能である。

#### 【0107】

また、小形でも駆動力が大きく、保持板程度の重量は楽に振動させられるため、圧電素子を用いた振動付与機構は直径10mm以下の開口7内に取り付けることも容易である。電子収束点の収差は電子レンズに近いほど小さいので、収差の少ない最小の電子収束径が得られる。したがって、X線焦点も最小とすることが

できる。さらに、X線焦点と被写体とを近づけることができ、撮影倍率を高くできるので、高空間分解能なX線透視像が得られる。また、ミクロンオーダの高精度制御性・高速性があるので、この発明における振動付与手段に最も適している。

## 【0108】

以上のような圧電素子のうち、バイモルフを用いた振動付与部23の一具体例について図9を参照して説明する。図9の(a)は縦断面図を示し、(b)は正面図を示す。

## 【0109】

図9に示す振動付与部23は、取り付け部材31と圧電バイモルフ33を備えている。取り付け部材31は、筒状を呈し、先端部材5の開口7内周面に取り付けられている。圧電バイモルフ33は板状で、取り付け部材31の上下二カ所に立設されている。それらの先端部には、保持体11の上下端部が取り付けられている。したがって、これら3つの部品により平行四辺形を形成している。また、これら圧電バイモルフ33は同一面が同じ方向に向くように取り付けられており、逆相でそれぞれ交流電圧が印加される。すると、図中に二点鎖線矢印で示すように、ターゲット9の面方向に振動が付与され、長寿命・高強度なX線管を実現する。

## 【0110】

例えば、圧電バイモルフ33の長さが5mm、振動振幅が $10\mu\text{m}$ である場合には、圧電バイモルフ33の長さは不変でほぼ直線状であるので、電子ビームBの入射方向における最大移動量は $5 - \sqrt{5^2 - 0.01^2} = 10\text{nm}$ となる。したがって、ターゲット9がこの程度移動しても、通常の電子ビームB径が $1\mu\text{m}$ 程度のX線焦点サイズであれば充分高精度な振動をさせることが可能である。

## 【0111】

さらに微小な焦点サイズの一例として、 $100\text{nm}$ 程度の場合でも、振動振幅を $1\mu\text{m}$ とすれば電子ビームBの入射方向における最大移動量は $5 - \sqrt{5^2 - 0.001^2} = 0.1\text{nm}$ となるので充分高精度な振動をさせることが可能である。それぞれの移動量/焦点サイズの比は、 $10\mu\text{m}/1\mu\text{m} = 10$ 倍、 $1\mu\text{m}$

$m/100nm=10$ 倍となっており、ターゲット9における実効的な電子衝突面積を大きくすることができているので、発生する熱を分散させて電子衝突による集中的なターゲットの温度上昇を抑制することができる。

#### 【0112】

次に、バイモルフを用いた振動付与部23の別の具体例を図10で説明する。図10の(a)は縦断面図を示し、(b)は正面図を示す。電子ビームの軌道は図5に模式図で示す。

#### 【0113】

この例では、電子ビームBの軌道が図5に示すように、側面から見て円弧状を呈するように振動を付与する。

#### 【0114】

振動付与部23は、上述した構成と同様に、取り付け部材31と圧電バイモルフ33を備えている。取り付け部材31は筒状を呈し、先端部材5の開口7内周面に取り付けられている。圧電バイモルフ33は板状に形成されて、取り付け部材31の同一高さ位置に左右にそれぞれ一つずつ立設されている。それらの先端部には、縦断面が円弧状を呈する保持体11の高さ方向の中央部であって左右方向の端部が取り付けられている。また、これらは同一面が同じ方向に振動するように配設されており、個々に逆相でそれぞれ交流電圧が印加される。すると、図中に二点鎖線矢印で示すように、ターゲット9の円弧面方向に振動が付与され、円弧状の軌道を描くように振動する。

#### 【0115】

次に、振動付与部23の別の具体例について、図11と図12を参照しながら説明する。なお、図11と図12の(a)は縦断面図を示し、(b)は正面図を示す。

#### 【0116】

この例では、上述した圧電バイモルフ33に代えて、直線変位型の圧電素子35を採用している。

#### 【0117】

すなわち、振動付与部23は、取り付け部材31と圧電素子35を備えている

。取り付け部材 3 1 は、筒状を呈し、先端部材 5 の開口 7 内周に取り付けられている。角柱状に形成された圧電素子 3 5 は、取り付け部材 3 1 の内周側上下二カ所に埋設されている。それらの内側面には、板状の保持体 1 1 の上下端部が取り付けられている。二つの圧電素子 3 5 は、ターゲット面に平行で互いに同じ方向に微小変位動作するように埋設されている。圧電素子 3 5 を駆動すると、図中に二点鎖線矢印で示すように、ターゲット 9 の面方向に振動が付与される。圧電素子 3 5 は、横変形・すべり変形の素子の場合には符号 3 5 a で、縦変形の素子の場合には符号 3 5 b で取り付け部材 3 1 に埋設される。さらに、単板型・積層型のどちらの圧電素子を用いてもよい。

## 【 0 1 1 8 】

この場合には、圧電バイモルフ 3 3 のように電子ビーム B の入射方向の変位を考慮する必要がなく、変位方向は圧電素子 3 5 の特性だけで決まっているので、より高精度な振動が可能である。

## 【 0 1 1 9 】

また、保持体 1 1 は軽量なので、図 1 2 に示すように、片持ち式に構成しても充分高精度な振動が可能である。

## 【 0 1 2 0 】

すなわち、上記の構成において、取り付け部材 3 1 の上下二カ所に埋設していた圧電素子 3 5 を下方のみに設けている。これによると、構成を簡易化しつつも上記同様の効果を得ることができる。

## 【 0 1 2 1 】

次に、請求項 7 に関する振動付与部 2 3 の具体例を 2 つ、図 1 3 と図 1 4 を参照しながら説明する。なお、図 1 3 と図 1 4 の ( a ) は縦断面図を示し、( b ) は正面図を示す。

## 【 0 1 2 2 】

この例では、□ 1 m m 程度で高さ数 m m 程度の直線変位型の圧電素子 3 5 を複数個集積したものを利用し、外形が正方形で中空部を有するように取り付け部材 3 1 に対して立設してある。そして、中空部を閉塞するように保持体 1 1 が取り付けられている。各圧電素子 3 5 は、それぞれ「すべり変形」で動作するように

され、かつ、図 1 3 (a) において、ターゲット 9 の面方向 (図の上下方向) に振動するように設定されている。

#### 【 0 1 2 3 】

この構成によると、圧電素子 3 5 と保持体 1 1 とを一体的に構成して、閉塞空間を形成することができる。したがって、図 1 のような真空窓 1 3 が不要となり、構成を簡易化できるとともに、X 線焦点と被写体とを近づけることができ撮影倍率を高くできるので、装置性能を高分解能にできる。

#### 【 0 1 2 4 】

なお、上記の構成においては、複数個の圧電素子 3 5 を用いたが、図 1 4 に示すような特殊な圧電素子を採用してもよい。

#### 【 0 1 2 5 】

この圧電素子 3 7 は、強誘電体材料を焼結成型して製造され、外径 5 mm 程度で長さ 5 ~ 2 0 mm 程度の円筒形を呈し、三次元動作が可能となっている。このような圧電素子 3 7 を利用した応用例として、走査プローブ顕微鏡の三次元スキャナがある。圧電素子 3 7 は、内周面に接地電極を備え、外周面に 5 分割された電極 X 1, X 2, Y 1, Y 2, Z を備えている。電極 X 1, X 2 は、筒軸に直交する方向に設定された X 軸に沿って対向して設けられ、電極 Y 1, Y 2 は Y 軸に沿って対向して設けられている。電極 Z は、筒軸に沿って設定された Z 軸周りに、上部外周面に環状に設けられている。

#### 【 0 1 2 6 】

この圧電素子 3 7 は、接地電極に対して外周面に設けられた電極に正電圧を印加すると伸長し、負電圧を印可すると収縮するように動作する。したがって、圧電素子 3 7 を上述した取り付け部材 3 1 に取り付けるが、電極 X 1, X 2, Y 1, Y 2 側を取り付け部材 3 1 側にした場合、対向配置されている電極 X 1, X 2 に逆極性の電圧を加えると、図 1 4 (b) に示すように動作する。つまり、電極 X 1 部分が伸長し、電極 X 2 部分が収縮して、全体が湾曲変形して電極 Z 側が X 方向に変位することになる。

#### 【 0 1 2 7 】

先端側における変位量は、筒の長さで印可電圧によって決まる。印可する走査

信号は、例えば、1 nmから数10  $\mu$ mまでの走査を数Vから200 V程度の電圧によって実現している。

## 【0128】

この圧電素子37の先端部分に、ターゲット9を有する保持体11を取り付けることにより、上述した図13の構成と同様の効果を得ることができる。その上、Z方向への変位も可能であるので、電子レンズと連動させてX線焦点の位置を変位させることができるので、被写体を動かすことなく撮影倍率を微調節することができるという利点も有する。なお、Z方向への変位は、電極Zに電圧を印可することにより行うが、10 nm/V程度の極めて微小な伸縮動作を行うこともできる。

## 【0129】

請求項8にあるように、本発明の振動付与部にはイタバネ(Flexure)を構成部品として用いるのが最適である。本発明のような1 mm以下の微小変位を行う場合、イタバネは塑性変形によるため、すべり動作・静摩擦・動摩擦・バッククラッシュがなく過酷な使用環境に耐える。鋼玉を使う軸受類のように潤滑材(グリース)の必要もないので、高真空・高温・高速な本発明に最適である。しかも、小形で高精度である点も有利である。

## 【0130】

イタバネを用いた具体例として図15～17を参照しつつ順次説明していく。なお、図15の(a)は縦断面図を示し、(b)は正面図を示し、図16は正面図を示し、図17は縦断面図を示す。

## 【0131】

図15は、圧電素子などの駆動素子36を取り付け部材31に備えた図11の構成と略同じである。相違するのは、保持体11を当接支持するように、イタバネ39が先端部材5に取り付けられている点にある。先端部材5及び保持体11とイタバネ39との接合は、熱伝導率の高い接着や溶接が好適である。

## 【0132】

また、イタバネ39の材料としては、熱伝導率の高さからセラミックや金属が好ましく、耐久性の面からバネの材料であるリン青銅やベリリウム銅が好ましい

。さらに、加工精度の面から、イタバネ 39 は金属厚板から放電加工によって掘り出して形成されるものが好ましい（請求項 9）。

#### 【0133】

このイタバネ 39 は、ターゲット 9 の熱を、保持板を通じて逃がすとともに、駆動素子 36 によって付与された振動により、電子ビーム B 方向にターゲット 9 が振動することを抑制する。したがって、振動に伴う X 線焦点の変動を抑制することができる。

#### 【0134】

なお、イタバネ 39 を、図 9～14 に述べた圧電素子を用いた構成に採用してもよいことは言うまでもない。

#### 【0135】

図 16 は、図 15 の構成と概略同じである。相違点は、イタバネ 39 と取り付け部材 31 に代えて、取り付け部材 50 と一体で形成されたイタバネ部 51 が採用されていることである。ターゲット 9 の保持体 11 は、熱伝導性の接着剤や溶接により接続することもできるが、保持体も含めた一体成型としている。

#### 【0136】

イタバネ部 51 は、振動する方向に薄く、振動と垂直方向に厚い形状となっており、アスペクト比が高い構造で、放電加工などを用いて形成される。図 16 のような「コ」の字構造の他にも、単板状、放射状などの様々な形状が考えられる。このようなアスペクト比が高いイタバネは、振動方向には小さな力で駆動できるが、振動と垂直な方向には動かし難い。したがって、電子ビーム方向に高精度な振動を可能にする。数ミクロン以下のサブミクロンの X 線焦点をもつ X 線管の振動付与機構の一部として用いるのに好適である。また、組立精度の点からも望ましい。

#### 【0137】

図 17 は、イタバネを用いた振動付与部 23 の他の構成を示す縦断面図である。

#### 【0138】

保持体 11A は、真空窓（13）を兼用するとともに、その周辺部がイタバネ



39aに形成されている。また、駆動素子36は、接続板41を介して保持体11Aに接続されている。保持体11Aは、例えば、円筒状の金属ブロックから放電加工によって掘り出して形成する。なお、接続板41を含めて形成することも可能である。

#### 【0139】

ターゲット9には保持体11を介して振動が付与されるので、振動を吸収できるイタバネ39aによりターゲット9を真空封止することができる。したがって、真空窓(13)を不要にでき、X線焦点と被写体との距離を最小にすることができ、幾何学的に拡大倍率を高くすることができる。また、ゴム等の弾性体と組み合わせたり、イタバネ39に代えてゴム等やベローズ等の弾性体だけで構成したりしてもよい(請求項10)。

#### 【0140】

次に請求項11の説明を行う。

#### 【0141】

##### ●問題点5の改善

『ターゲット厚さを薄くすることで、ターゲットによるX線の不要な吸収をなくす』

従来は、問題点5で述べたように、ターゲットが5 $\mu$ mなどと厚めにしているため、ターゲットにおけるX線の不要な吸収が生じていた。しかし、この発明においては、ターゲットを長寿命化することができるので、ターゲット厚を5 $\mu$ mから2.4 $\mu$ m(つまり2.6 $\mu$ m薄くする)と最低限の厚さにしてもよい。

#### 【0142】

例えば、管電圧40kVのとき加速された40keVのエネルギーをもった電子はタングステンターゲットに衝突して、X線を発生させながら最大で2.6 $\mu$ m進入する。本発明では、ターゲットを長寿命にできるので、この電子最大進入深さ2.6 $\mu$ mと同じターゲット厚さとしてもよく、従来余分に付加されていた2.4 $\mu$ mのタングステンによるX線吸収20%をなくすことができる。従って、従来の5 $\mu$ mターゲットに比べ、1.2倍の作業効率にできる。特に、吸収の割合が大きな低エネルギーにおける効果が大きい。

【0143】

ここで、密度 $\rho$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] のターゲットに、エネルギー $E$  [ $\text{keV}$ ] を有する電子が進入する最大進入深さ $R$  [ $\mu\text{m}$ ] は、次の(4)式でほぼ計算できる。

【0144】

$$R = 0.0021 (E^2 / \rho) \dots\dots (4)$$

【0145】

したがって、加速電圧 $E$  [ $\text{keV}$ ] のとき、X線発生が最大となるターゲット厚さは最大進入深さ $R$ となる。したがって、上記(4)式で表されるターゲット厚さを採用すればよい。

【0146】

なお、必ずしも上記(4)式で表される厚さに限定されるものではないが、おおむね計算される最大進入深さ $R$ の2倍以下の厚さであればこの発明の効果が期待できる。特に、吸収されやすい軟X線を発生させる場合に好適である。

【0147】

また、ミクロンオーダー以下の衝突径 $s$  [ $\mu\text{m}$ ] の場合には、衝突径 $s$ と同じ厚さ $t$  ( $=s$ ) [ $\mu\text{m}$ ] とすることは、X線焦点サイズを微小化する点においてより好ましい。

【0148】

次に請求項12の説明を行う。

電子ビームが低出力の場合には、上述した振動制御部25が次のようにターゲットを変位するようにしてもよい。

【0149】

すなわち、電子ビームの出力が低い場合には、例えば、数ヶ月や数週間のオーダーでターゲット9を変位させて電子の衝突点の位置を換える。その場合、各位置において振動を付与しておいてもよいし付与しなくてもよいが、変位により、ターゲット9の異なる衝突点に電子ビームBの衝突点を短時間で移動させることができる。そのため、固定式の場合に行っていた真空引きの時間が不要になるので、短時間でターゲットの交換ができ、作業効率が悪くならないようにできる。

## 【0150】

なお、この発明は上述した実施例に限定されるものではなく、以下のように変形実施が可能である。

## 【0151】

(1) 振動付与部 23 の駆動源としては、上述したもののほかに、電歪素子、静電アクチュエータ、磁気歪素子等を採用することができる。また、電磁モータやソレノイドなどを電子ビームから遠く離して構成したり、磁気シールドを入れたりして、ターゲットを振動させるようにしてもよい。この場合も、小形で高分解能にはできないが、長寿命化する効果大きい。

## 【0152】

(2) 振動付与部 23 のイタバネに代えて、線状バネ、金属金網、すべり軸受、セラミック製玉軸受、弾性金属体などを用いてもよい。

## 【0153】

(3) 上述した例は、全て透過型の X 線発生装置 1 であるが、この発明は図 18 に示すように反射型の X 線発生装置 1A にも適用することができる。なお、図 18 は、反射型の X 線発生装置 1A における概略構成を示す縦断面図である。

## 【0154】

反射型の X 線発生装置 1A は、電子ビーム B 方向に対して、ターゲット 9 を有する保持体 11 を傾斜姿勢で位置させるための支持台 43 を備え、その先端中央部に連結棒 45 が、例えば圧電素子 35 を介して取り付けられている。連結棒 45 の先端部には保持体 11 が取り付けられ、保持体 11 の側面と支持台 43 の側面を連結するように柔軟性を備えた接続板 47 が配設されている。

## 【0155】

圧電素子 35 を駆動すると、ターゲット 9 の面方向に振動が付与される。したがって、このような反射型の X 線発生装置 1A であっても、上述した透過型の X 線発生装置 1 と同様の熱的な効果を奏し、長寿命と高 X 線強度を実現できる。

## 【0156】

## 【発明の効果】

以上の説明から明らかなように、この発明によれば、振動付与手段によって電

子ビームの衝突点をターゲット上で移動させることができ、ターゲットにおける実効的な電子衝突面積を大きくできるので、発生する熱を分散させて電子衝突による集中的なターゲットの温度上昇を抑制することができる。したがって、ターゲットの蒸散を減少させることができる。その結果、ターゲットを厚くすることなくターゲットの長寿命化を図ることができ、ターゲットの交換・調整に起因する装置の稼働率を高めることができ、連続したX線発生時間を長くできる。その上、X線強度を数倍以上向上させることができ、作業効率を上げられる。さらに、高精度に振動させられるので、従来にない高強度で微小なX線源を実現でき、検査精度を高めることができる。さらに、小型なので撮影倍率を大きくした空間分解能の高いX線装置とすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

X線発生装置の概略構成を示す縦断面図である。

【図 2】

X線発生装置の概略構成を示すブロック図である。

【図 3】

ターゲット上における電子ビームの軌道を示す模式図である。

【図 4】

電子ビームの衝突面を拡大した模式図である。

【図 5】

ターゲット上における電子ビームの他の軌道を示す模式図である。

【図 6】

ターゲット上における電子ビームの他の軌道を示す模式図である。

【図 7】

ターゲット上における電子ビームの他の軌道を示す模式図である。

【図 8】

ターゲット上における電子ビームの他の軌道を示す模式図である。

【図 9】

振動付与部の構成を示す図であって、(a)は縦断面図を示し、(b)は正面

図を示す。

【図 1 0】

振動付与部の他の構成を示す図であって、（a）は縦断面図を示し、（b）は正面図を示す。

【図 1 1】

振動付与部の他の構成を示す図であって、（a）は縦断面図を示し、（b）は正面図を示す。

【図 1 2】

振動付与部の他の構成を示す図であって、（a）は縦断面図を示し、（b）は正面図を示す。

【図 1 3】

振動付与部の他の構成を示す図であって、（a）は縦断面図を示し、（b）は正面図を示す。

【図 1 4】

円筒型圧電素子の構成を示す図であって、（a）は外観斜視図を示し、（b）は動作の一態様を示す縦断面図である。

【図 1 5】

振動付与部の他の構成を示す図であって、（a）は縦断面図を示し、（b）は正面図を示す。

【図 1 6】

放電加工により製造したイタパネを用いた概略構成を示す正面図である。

【図 1 7】

イタパネを用いた概略構成を示す縦断面図である。

【図 1 8】

反射型の X 線発生装置における概略構成を示す縦断面図である。

【符号の説明】

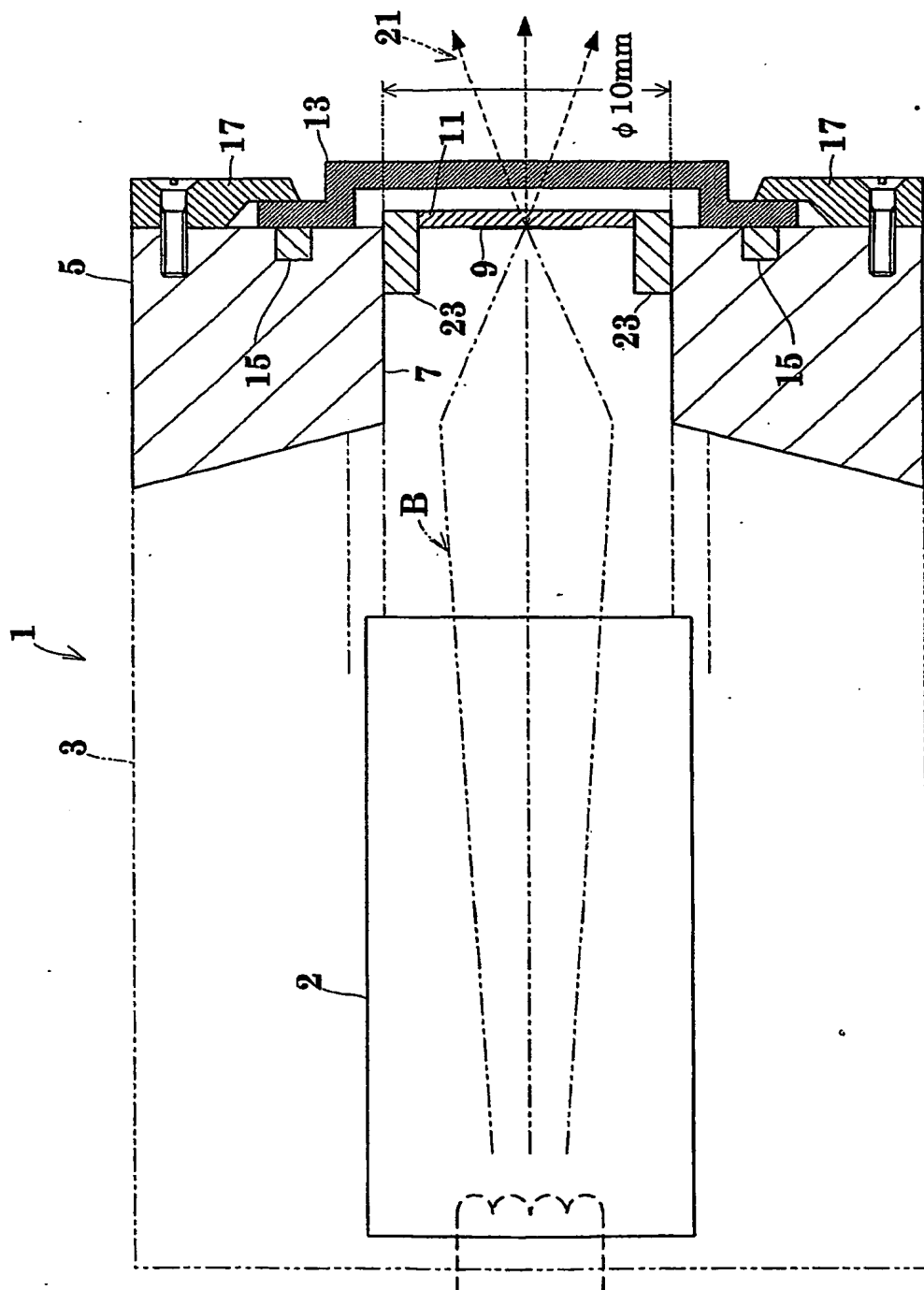
- 1 … 透過型の X 線発生装置
- 9 … ターゲット
- 1 1 … 保持体

- 1 3 ... 真空窓
- B ... 電子ビーム
- 2 1 ... 照射 X 線
- 2 3 ... 振動付与部 (振動付与手段)
- 2 5 ... 振動制御部 (振動制御手段)
- 2 7 ... 高電圧発生器
- 2 9 ... 制御部
- 3 1 ... 取り付け部材
- 3 3 ... 圧電バイモルフ
- 3 5, 3 7 ... 圧電素子
- 3 9 ... イタバネ
- 4 1 ... 接続板
- 3 6 ... 駆動部
- 5 0 ... 取り付け部材
- 5 1 ... 一体で形成されたイタバネ部

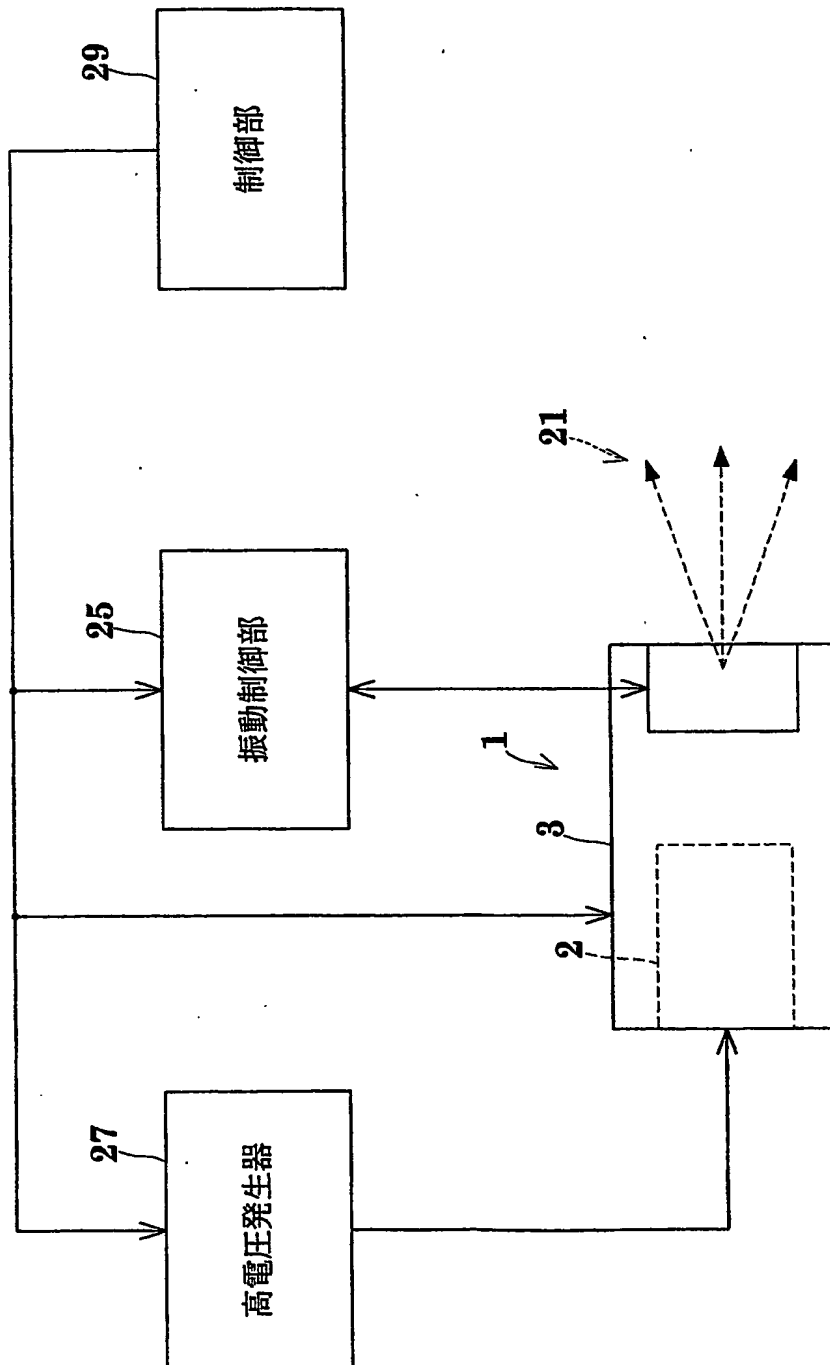
【書類名】

図面

【図 1】

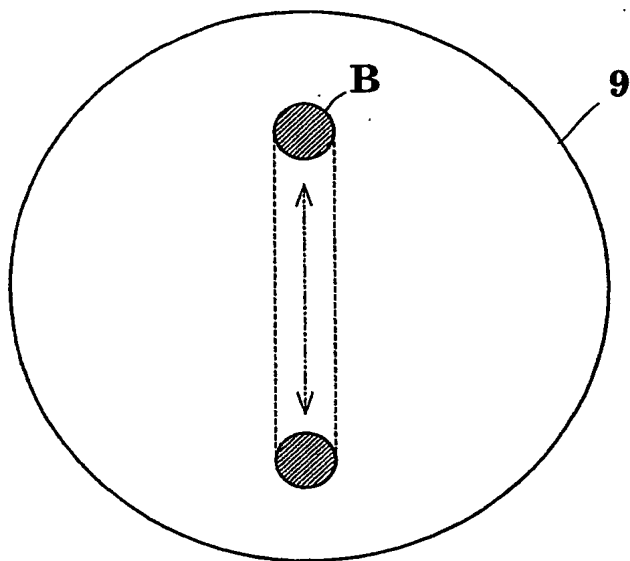


【図 2】

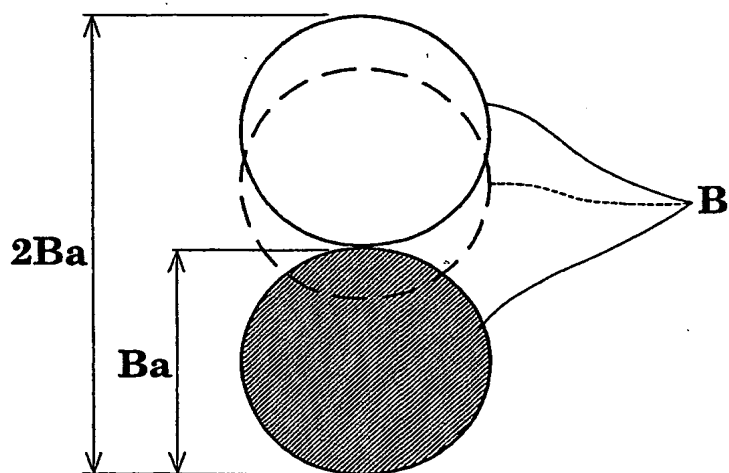




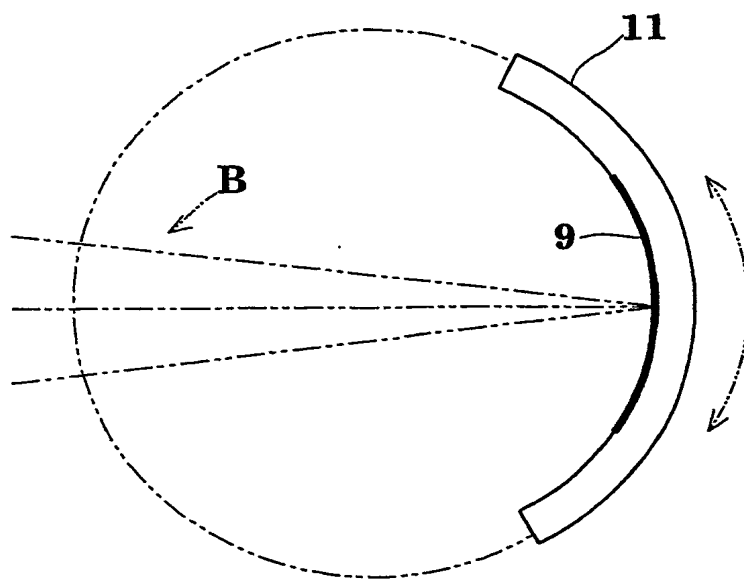
【図3】



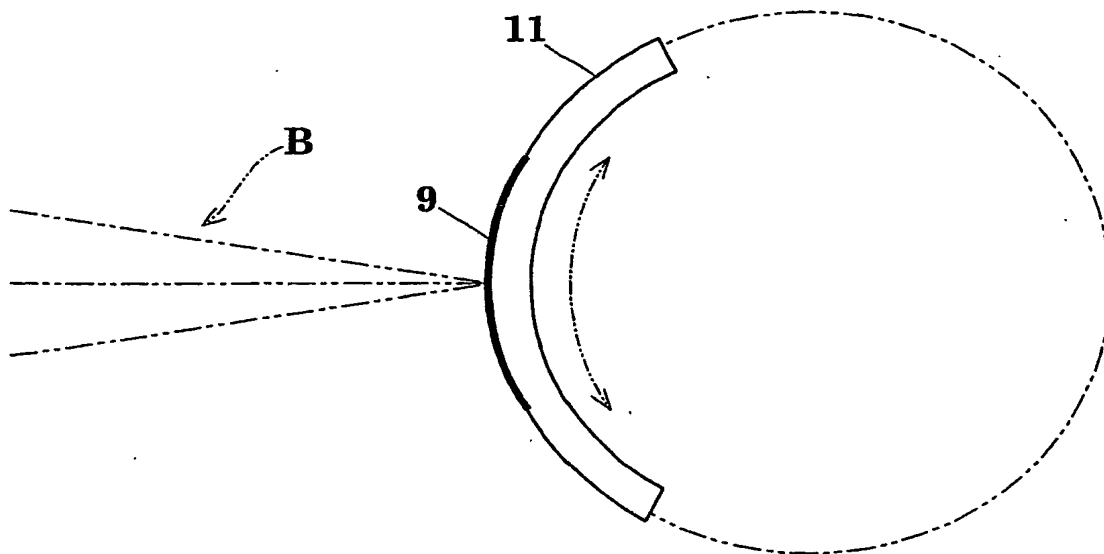
【図4】



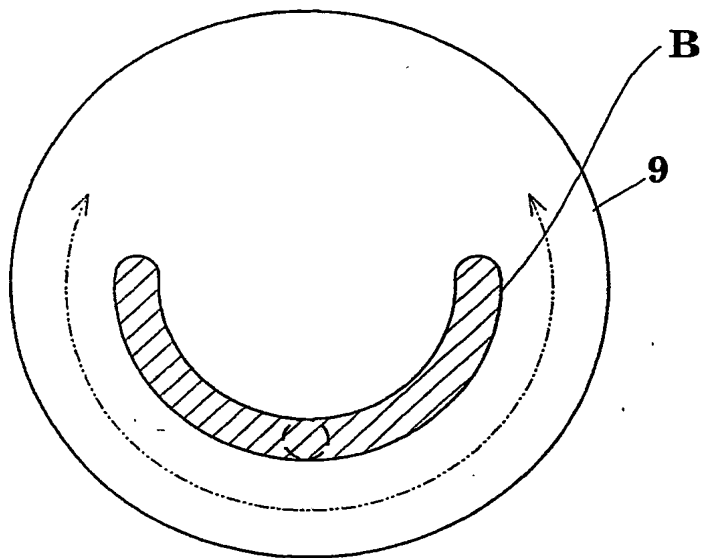
【図 5】



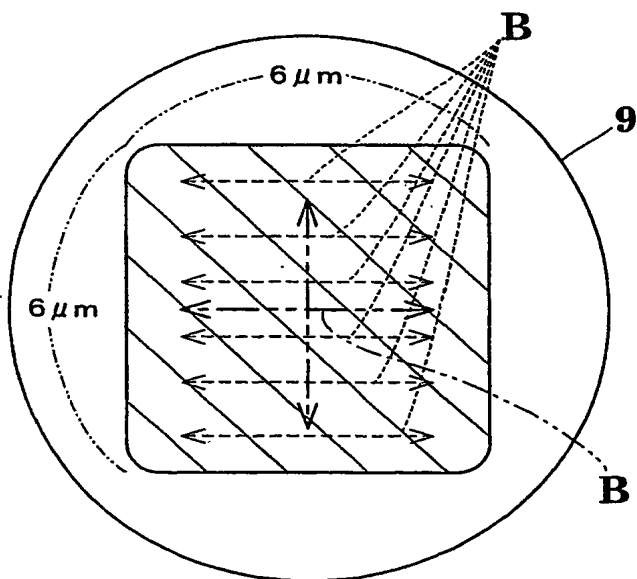
【図 6】



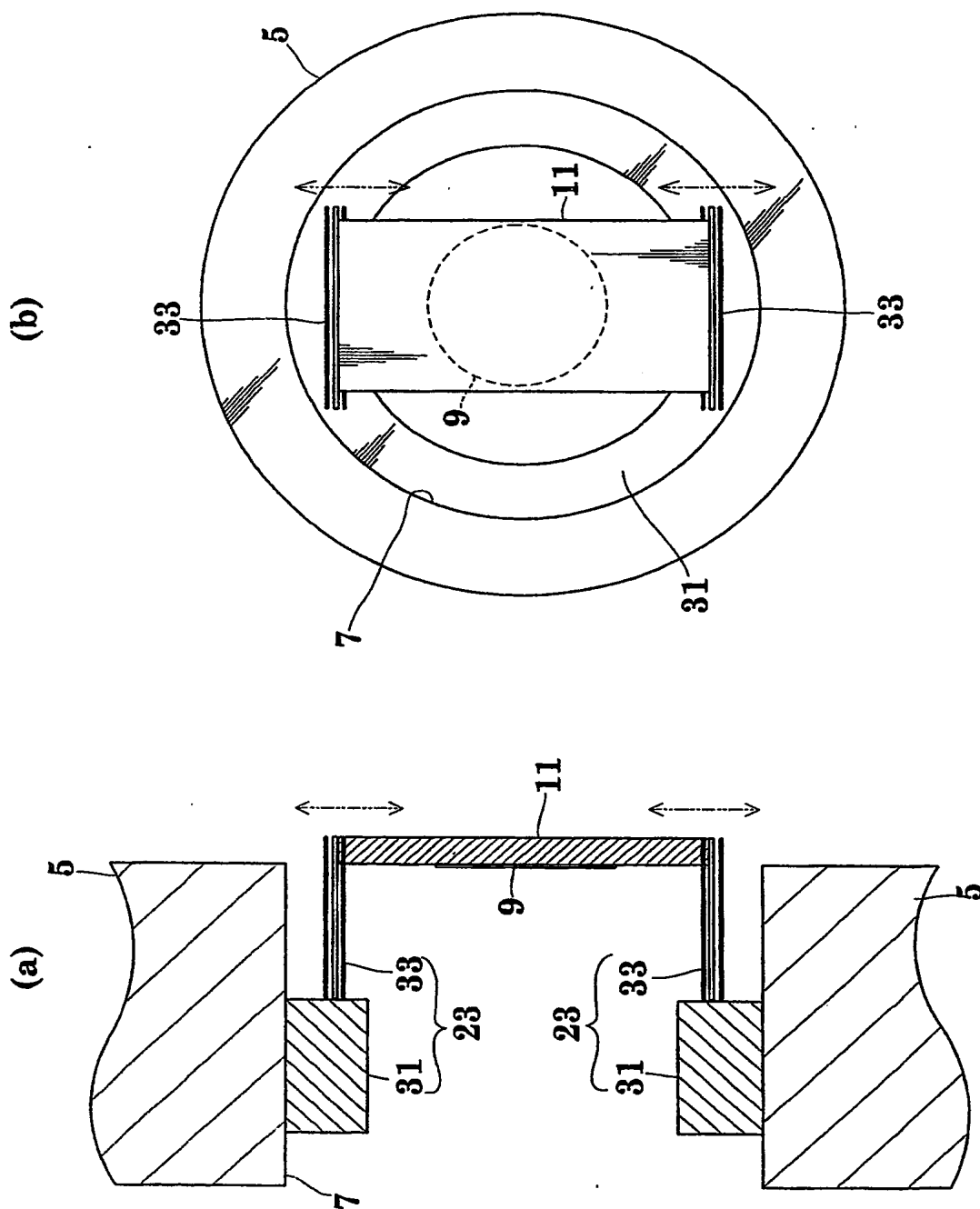
【図 7】



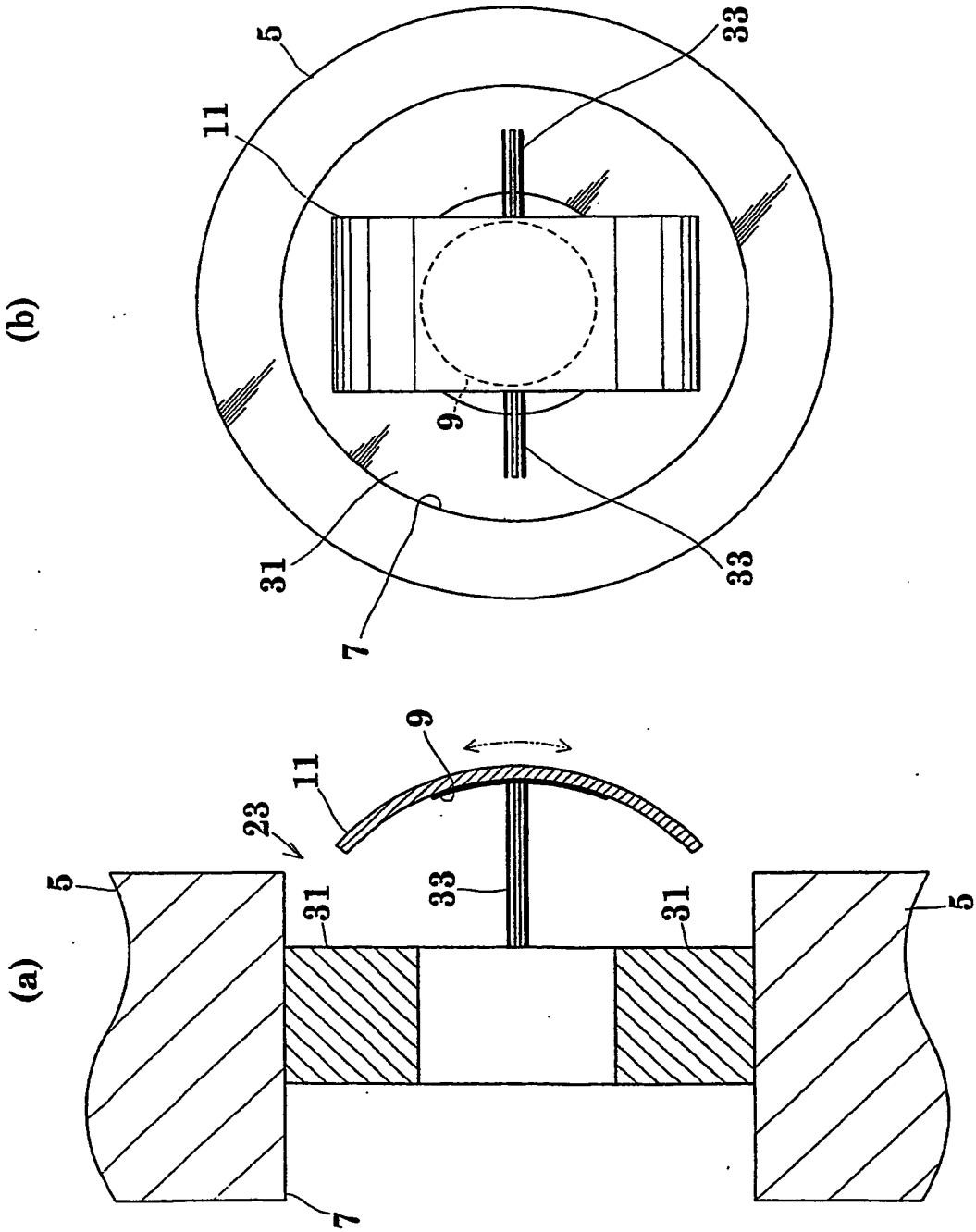
【図 8】



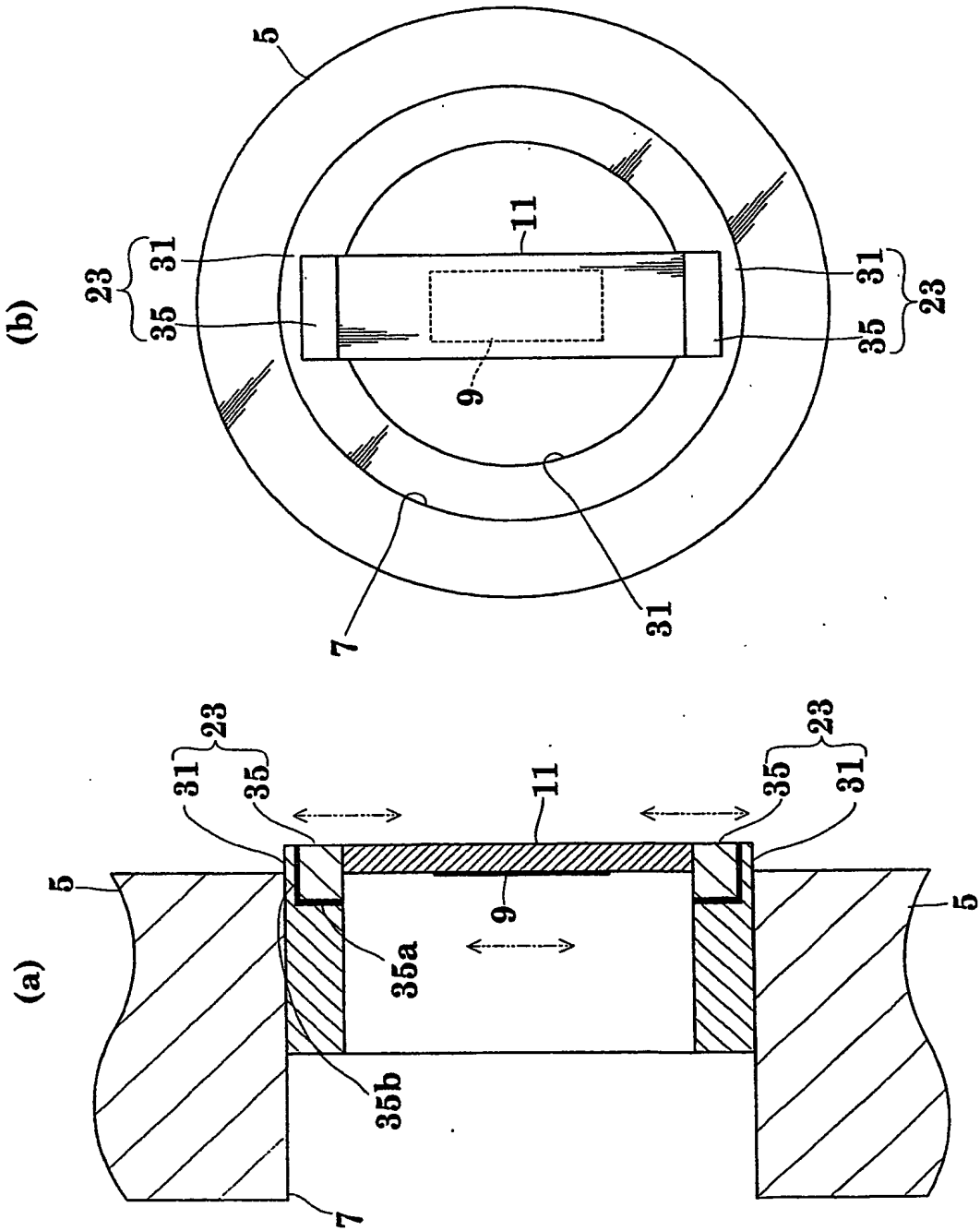
【図 9】



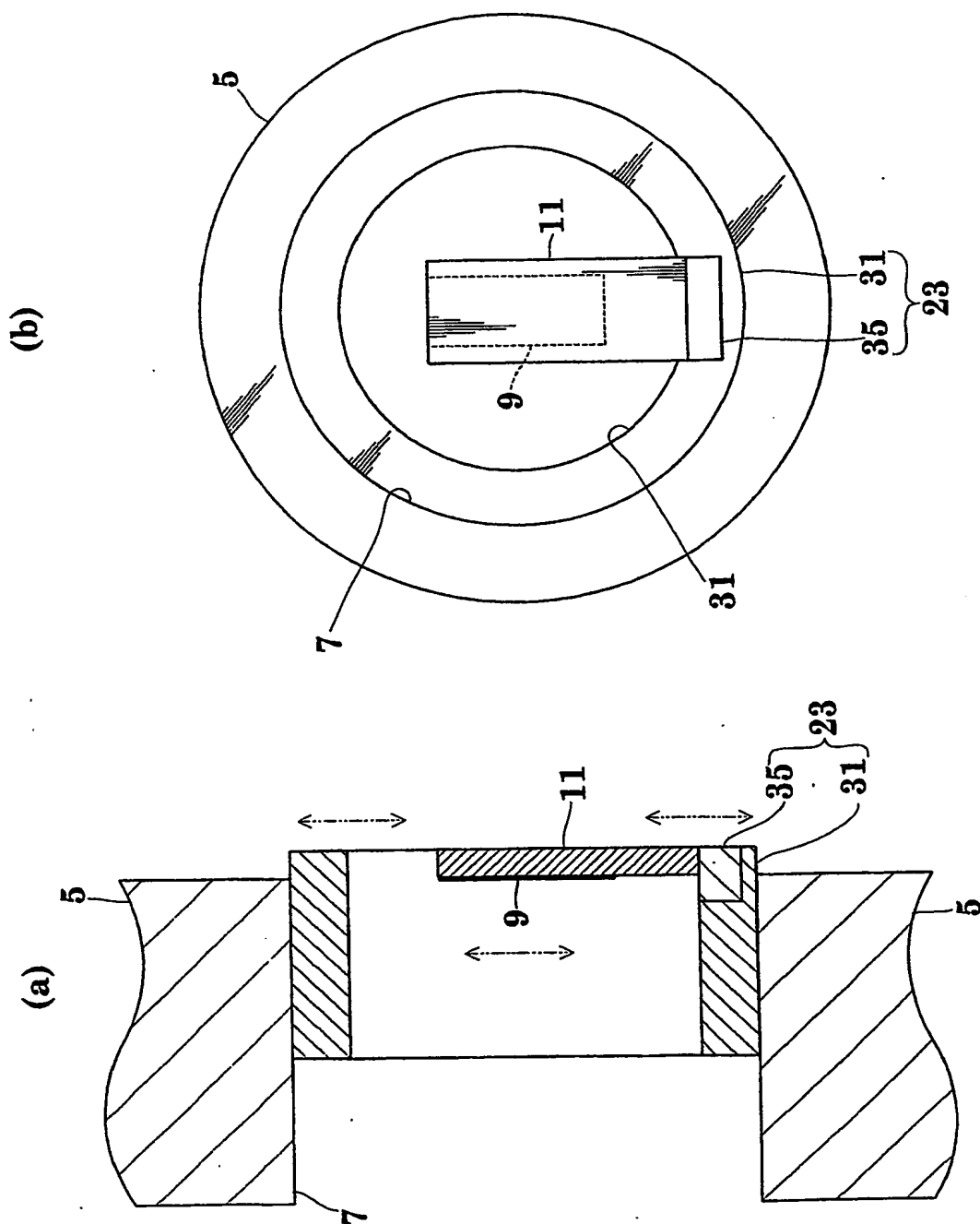
【図10】



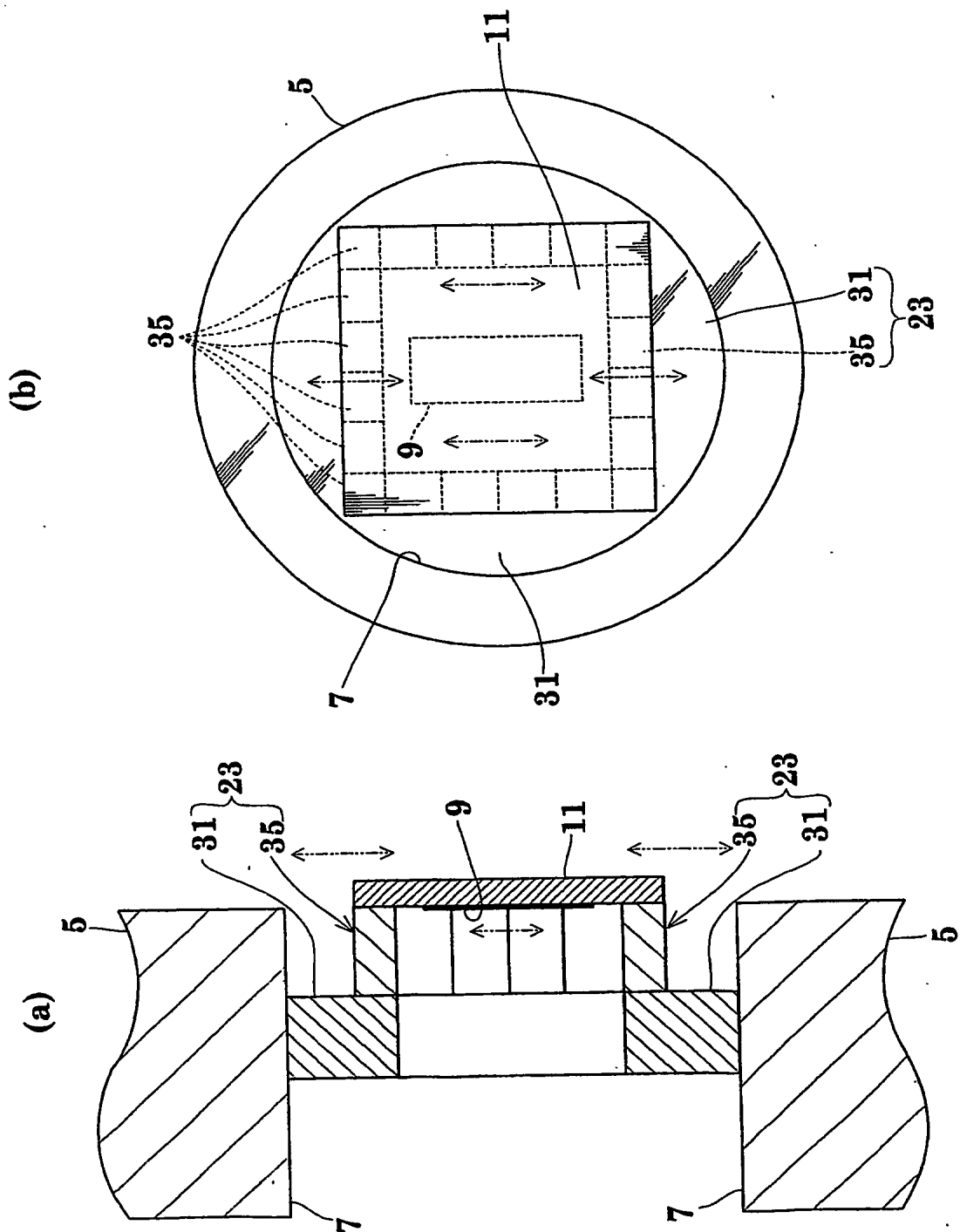
【図 11】



【図 12】

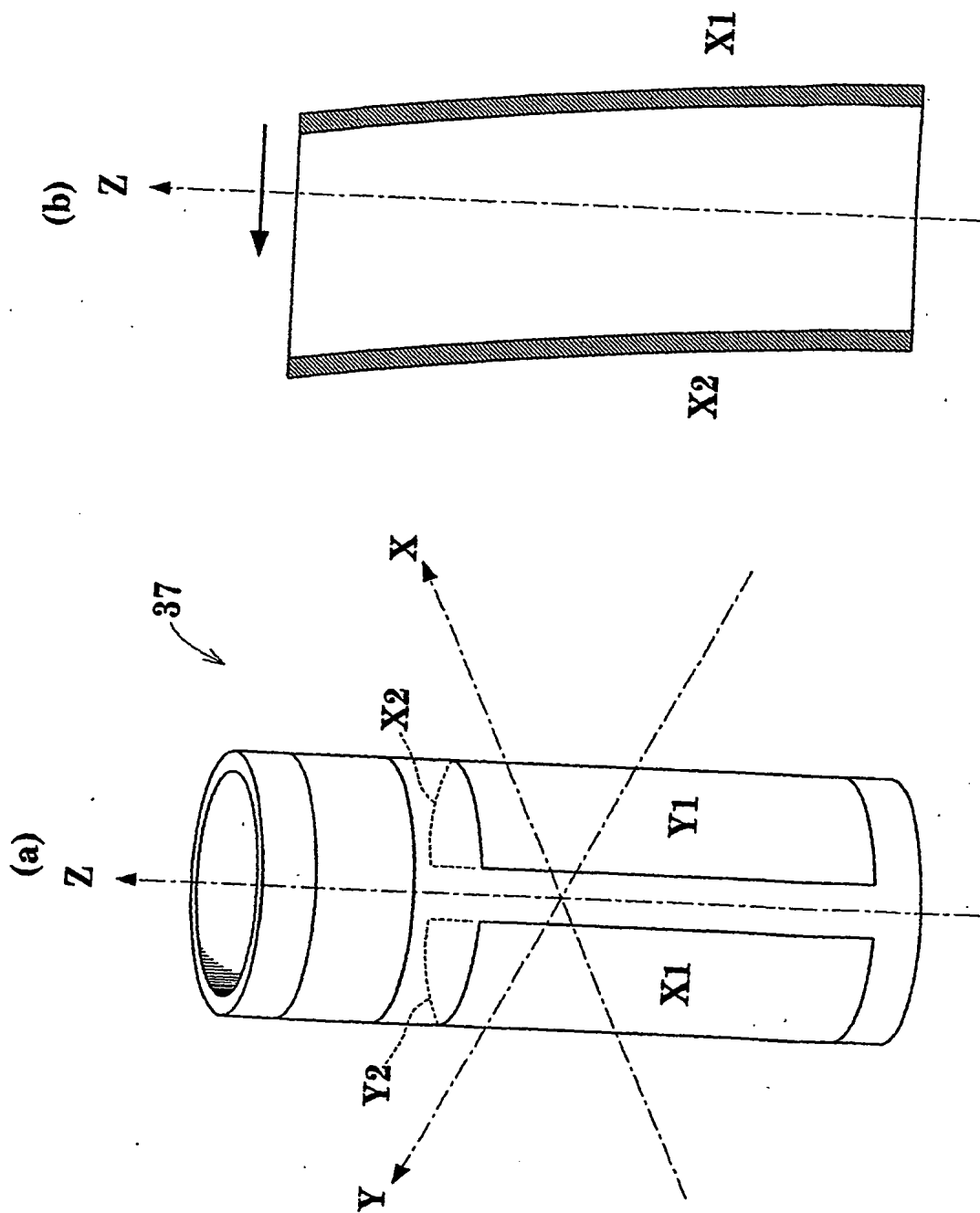


【図 13】

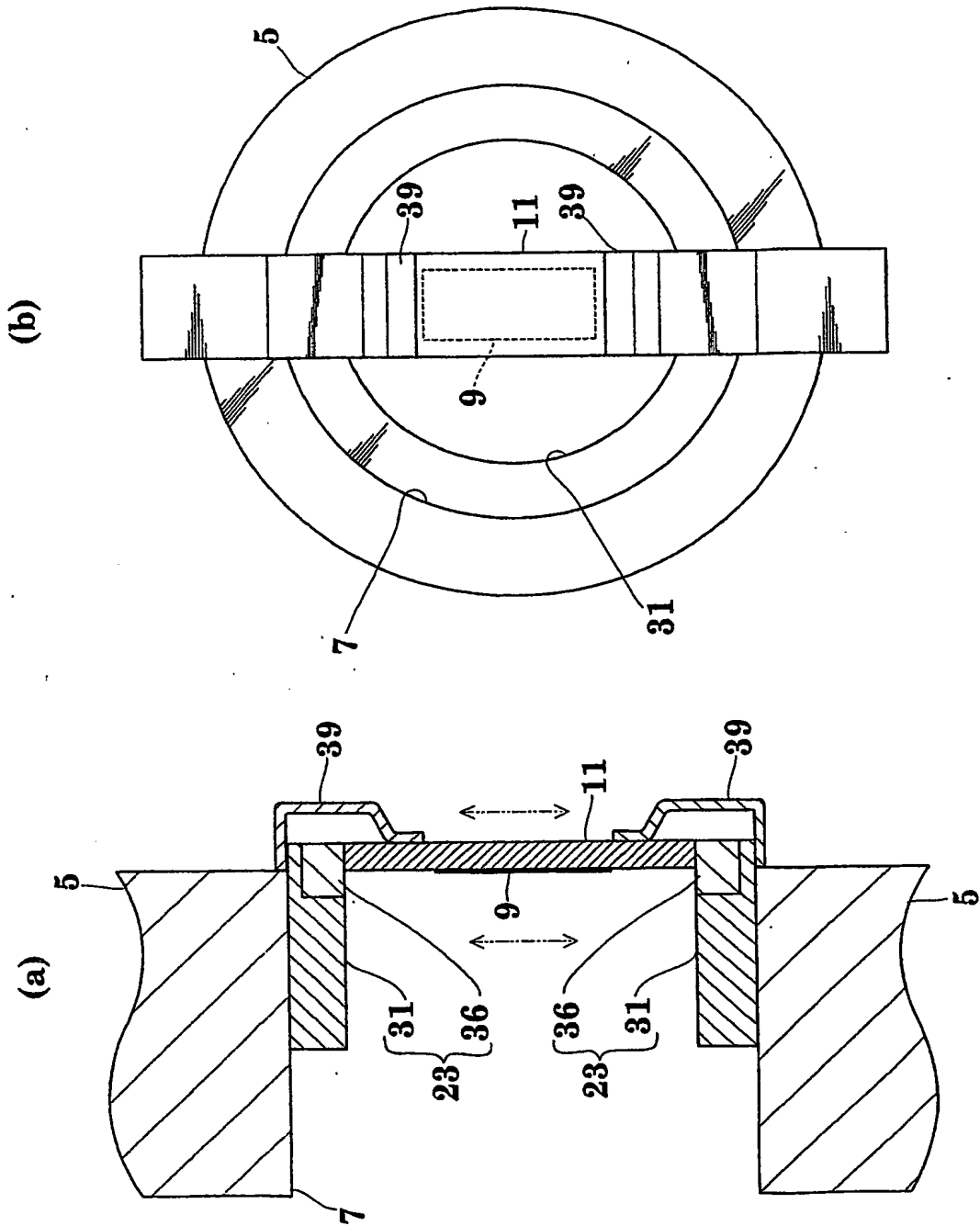




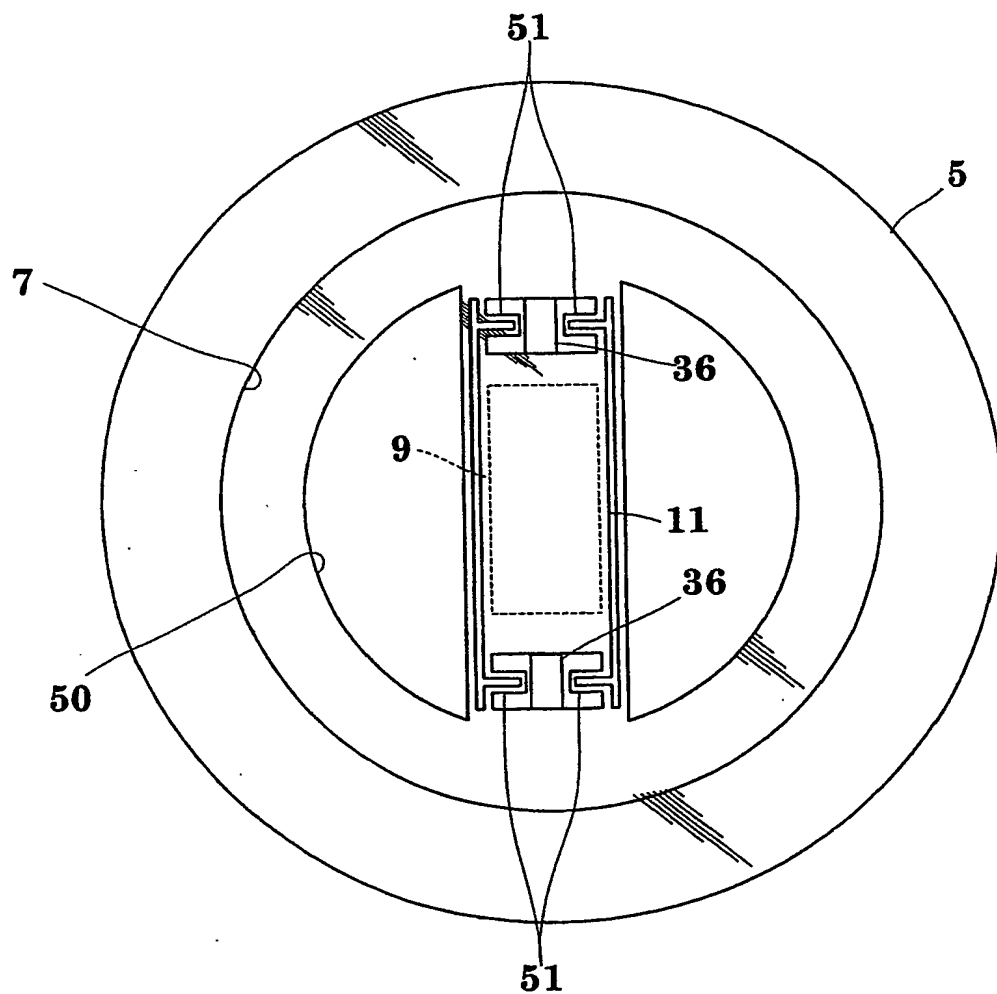
【図 14】



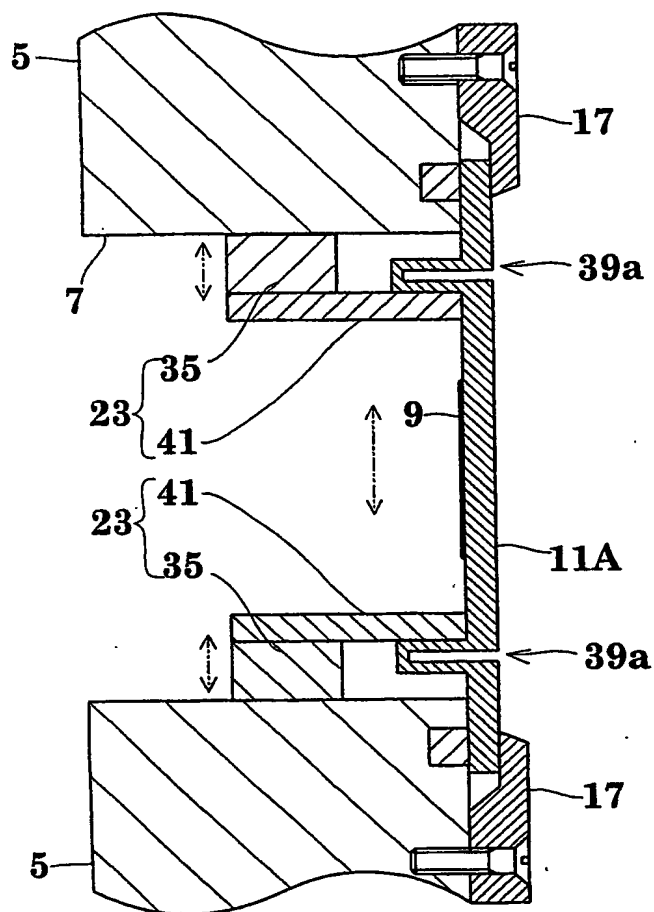
【図 15】



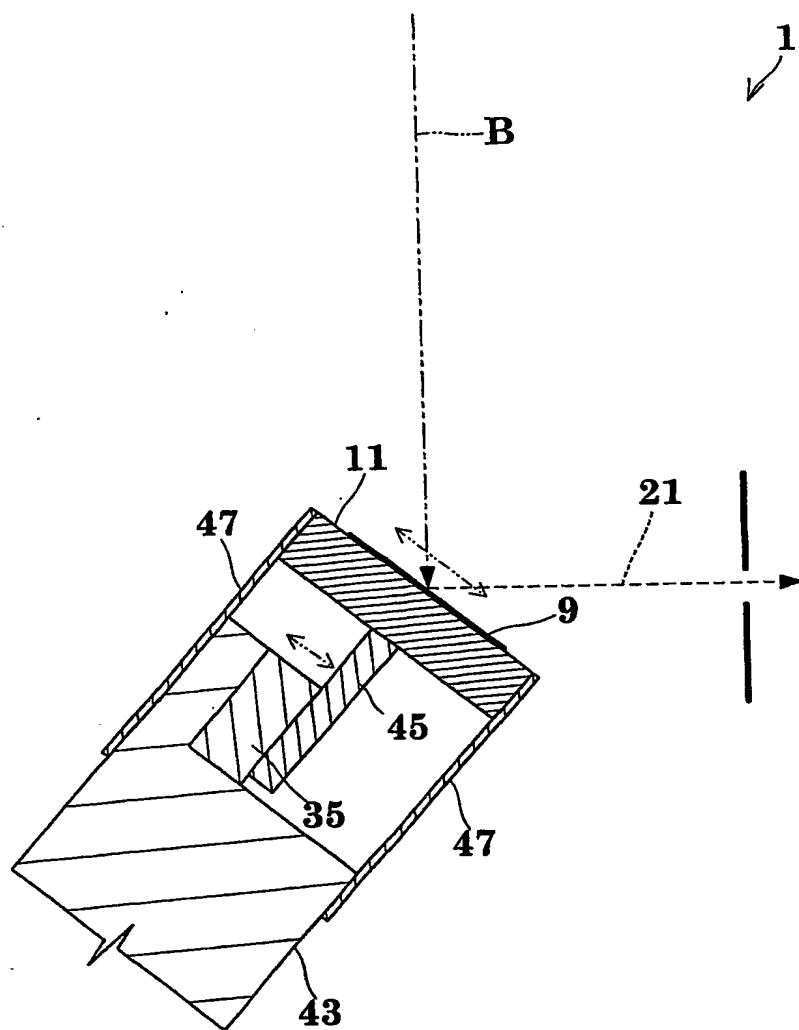
【図 16】



【図17】



【図18】



【書類名】

要約書

【要約】

【課題】 ターゲットを振動させて実効的な電子衝突面積を大きくすることにより、ターゲットを厚くすることなくその長寿命化を図って装置の稼働率を高め、連続したX線の発生時間を長くすることができる。

【解決手段】 振動付与部によって電子ビームBの衝突点をターゲット9上で移動させることができ、ターゲット9における実効的な電子衝突面積を大きくできるので、発生する熱を分散させて電子衝突による集中的なターゲット9の温度上昇を抑制することができる。したがって、ターゲット9の蒸散を減少させることができる。その結果、ターゲット9を厚くすることなくターゲット9の長寿命化を図ることができ、ターゲット9の交換・調整に起因する装置の稼働率を高めることができ、連続したX線発生時間を長くできる。

【選択図】

図3

出願人履歴情報

識別番号 [000001993]

1. 変更年月日	1990年 8月27日
[変更理由]	新規登録
住 所	京都府京都市中京区西ノ京桑原町1番地
氏 名	株式会社島津製作所